

Analýza parametrů kvality v sítích s wattroutery

Analysis of Quality Parameters in Networks
with Wattrouters

Bc. Jan Herman

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

Ostrava, 2021

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. za vstřícný přístup, odborné vedení a předání cenných zkušeností a rad.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou parametrů kvality elektrické energie v sítích s WATTroutery. V první části se zaměřuje na teorii jednotlivých parametrů, jejich příčiny a možnosti omezení. V druhé části je popsána funkce WATTrouterů. Následují technické možnosti měření parametrů kvality v praxi a jejich podrobnější popis. V závěrečné části práce se vyhodnocují naměřené hodnoty a porovnávají se výsledky parametrů s limity dle normy ČSN EN 50160.

Klíčová slova

Analýza, WATTrouter, parametry, elektrická energie, kvalita napětí, nesymetrie, harmonické, flickr, kolísání napětí, celkové harmonické zkreslení, frekvence, analyzátory, norma.

Abstract

The diploma thesis deals with the analysis of electrical energy quality parameters in networks with WATTrouters. In the first part, we focus on individual parameters, their causes and possibilities of limitation. The second part describes the function of WATTrouters. The following are the technical possibilities of measuring quality parameters in practice and their more detailed description. In the final part of the work, the measured values are evaluated and the results of the parameters are compared with the limits according to the ČSN EN 50160 standard.

Key Words

Analysis, WATTrouter, parameters, electrical energy, voltage quality, asymmetry, harmonics, flicker, voltage fluctuations, harmonic distortion factor, frequency, analyzers, standard.

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	12
Úvod.....	13
1 Teoretický rozbor problematiky kvality elektrické energie	14
1.1. Elektromagnetická kompatibilita	14
1.1.1. Elektromagnetická kompatibilní úroveň	14
1.1.2. Rušení a rušivé účinky	15
1.2. Harmonické v elektrických sítích.....	16
1.2.1. Fourierova řada	17
1.2.2. Výkony při neharmonických průbězích	19
1.2.3. Veličiny charakterizující obsah harmonických v elektrické síti.....	20
1.2.4. Generování harmonických	22
1.2.5. Problémy způsobené harmonickými	23
1.2.5.1. Problémy způsobené harmonickými proudy	24
1.2.5.1.1. Přetížení středního vodiče	24
1.2.5.1.2. Přehřátí transformátoru.....	25
1.2.5.1.3. Rušení při spínání vypínačů	25
1.2.5.1.4. Přetěžování kompenzačních kondenzátorů	26
1.2.5.1.5. Skin efekt.....	26
1.2.5.2. Problémy způsobené harmonickým napětím.....	26
1.2.5.2.1. Harmonické zkreslení napětí	26
1.2.5.2.2. Indukční motory	28
1.2.5.2.3. Poruchy při průchodu nulou	28
1.2.5.3. Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti.....	28
1.2.6. Možnosti omezení harmonických	28
1.2.6.1. Pasivní filtry	28
1.2.6.1.1. Plynulé řízení.....	28
1.2.6.1.2. Sériová kombinace LC filtru	29
1.2.6.1.3. Možnost zapojení filtrační kompenzační baterie.....	30
1.2.6.2. Aktivní filtry.....	30
1.2.6.2.1. Plynulé řízení.....	30
1.2.6.2.2. Paralelní aktivní filtry.....	30
1.2.6.2.3. Sériové aktivní filtry.....	31

1.2.6.3.	Kombinované aktivní filtry	32
1.3.	Meziharmonické (interharmonické)	32
1.4.	Kolísání napětí	32
1.5.	Flikr	33
1.5.1.	Míra vjemu flikru	34
1.5.2.	Krátkodobá míra vjemu flikru P_{st}	35
1.5.3.	Dlouhodobá míra vjemu flikru P_{lt}	36
1.5.4.	Možnost omezení kolísání napětí	36
1.6.	Poklesy a přerušení napětí	37
1.6.1.	Pokles napětí	37
1.6.2.	Poklesy vlivem velké zátěže	38
1.6.3.	Poklesy způsobené poruchami v síti	38
1.6.4.	Přerušení napětí	38
1.6.5.	Poruchy v rozvodné síti	39
1.6.5.1.1.	Externí příčiny	39
1.6.5.1.2.	Interní příčiny	39
1.6.5.2.	Krátkodobé přerušení napájecího napětí	40
1.6.5.3.	Dlouhodobé přerušení napájecího napětí	40
1.6.6.	Účinky poklesu napětí a krátkých přerušení napětí	41
1.7.	Nesymetrie napětí	41
1.7.1.	Trojfázová soustava harmonických veličin	41
1.7.2.	Zdroje napět'ové nesymetrie	44
1.7.3.	Důsledky působení nesymetrie	44
1.7.4.	Možnosti snížení napět'ové nesymetrie	44
1.7.4.1.	Scottův transformátor	45
1.7.5.	Symetrizační zařízení	45
1.8.	Přepětí	46
1.8.1.	Druhy přepětí	46
1.8.1.1.	Atmosférické přepětí	48
1.8.1.2.	Spínací přepětí	48
1.8.1.3.	Přepětí při zemním spojení	48
1.8.1.4.	Přepětí při vypínání zkratů	48
1.8.1.5.	Přepětí při vypínání malých induktivních proudů	48
1.8.1.6.	Přepětí při spínání kapacitních proudů	49
1.8.2.	Způsob eliminace přepětí	49
1.8.2.1.	Ochrana vedení před atmosférickým přepětím	49

1.8.2.2.	Svodič přepětí.....	49
2	Popis funkce WATTrouterů	50
3	Technické možnosti měření parametrů kvality	52
3.1.	Ruční analyzátory.....	52
3.2.	Stacionární analyzátory	52
3.3.	Přenosné analyzátory.....	52
3.3.1.	Sdružený analyzátor sítí BK-ELCOM v provedení ENA330	52
3.3.2.	PQ monitor Meg38/C	53
3.3.3.	PQ Monitor UP – 2210.....	54
4	Vyhodnocení měření parametrů kvality v sítích s WATTroutery	56
4.1.	Místo 1	56
4.1.1.	Grafické zpracování	56
4.1.2.	Vyhodnocení	62
4.2.	Místo 2	62
4.2.1.	Grafické zpracování	62
4.2.2.	Vyhodnocení	68
4.3.	Místo 3	68
4.3.1.	Grafické zpracování	68
4.3.2.	Vyhodnocení	74
4.4.	Místo 4	74
4.4.1.	Grafické zpracování	74
4.4.2.	Vyhodnocení	80
4.5.	Místo 5	80
4.5.1.	Grafické zpracování	80
4.5.2.	Vyhodnocení	86
4.6.	Místo 6	86
4.6.1.	Grafické zpracování	86
4.6.2.	Vyhodnocení	92
4.7.	Místo 7	92
4.7.1.	Grafické zpracování	92
4.7.2.	Vyhodnocení	98
5	Srovnání vyhodnocených dat	99
6	Závěr	101
	Použitá literatura	103

Seznam použitých zkratek

L1	- První fáze
L2	- Druhá fáze
L3	- Třetí fáze
THF	- Harmonic distortion factor – Činitel harmonického zkreslení
THDI	- Total harmonic distortion current – Celkové harmonického zkreslení proudu
THDU	- Total harmonic distortion voltage – Celkové harmonického zkreslení napětí
NN	- Nízké napětí
VN	- Vysoké napětí
VVN	- Velmi vysoké napětí
ČSN	- Česká státní norma
EN	- Evropská norma
IEC	- International Electrotechnical Commission – Mezinárodní technická komise
FFT	- Fast Fourier transform – Rychlá Fourierova transformace
USB	- Universal serial bus – Univerzální sériová sběrnice

Seznam obrázků

Obrázek 1 Elektromagnetická kompatibilní úroveň [1]	15
Obrázek 2 Elektromagnetické rušení a přípustné hladiny [1]	15
Obrázek 3 Schéma elektromagnetického prostředí [3]	15
Obrázek 4 Základní harmonická s třetí a pátou harmonickou [8]	17
Obrázek 5 Deformovaný časový průběh proudu [8]	20
Obrázek 6 Časový průběh proudu lineární zátěží [8]	22
Obrázek 7 Časový průběh proudu nelineární zátěží [8]	22
Obrázek 8 Sčítání 3n harmonických proudů ve středním vodiči [8]	24
Obrázek 9 Přepočítání zatížení kabelu pro 3n harmonickou [8]	25
Obrázek 10 Náhradní schéma pro nelineární zátěž a kompenzační kondenzátor [8]	26
Obrázek 11 Zkreslení napětí vlivem nelineární zátěže [8]	27
Obrázek 12 Oddělení lineární a nelineární zátěže [8]	27
Obrázek 13 Schéma pro fázové řízení proudu při indukční zátěži a časový průběh proudů indukčností a kapacitou [10]	29
Obrázek 14 Schéma filtrační kompenzační baterie [10]	30
Obrázek 15 Paralelní aktivní filtr připojený do sítě [1]	31
Obrázek 16 Sériový aktivní filtr připojený do sítě [1]	31
Obrázek 17 Kombinované filtry připojené do sítě [1]	32
Obrázek 18 Kolísání napětí se znázorněnými základními pojmy [1]	33
Obrázek 19 Schéma náhradního obvodu napájecí sítě [1]	33
Obrázek 20 Časový průběh kolísání napětí [1]	34
Obrázek 21 Časový průběh poklesu napětí [13]	37
Obrázek 22 Model obvodu a vektorový diagram se změnami napětí vlivem připojení k síti [1]	38
Obrázek 23 Průběh napětí a proudu při funkci OZ [1]	40
Obrázek 24 Rozložení nesymetrické soustavy na tři souměrné soustavy [16]	41
Obrázek 25 Schéma zapojení scottova transformátoru [17]	45
Obrázek 26 Schéma zapojení Steinmetzova zapojení [17]	45
Obrázek 27 Průběh trvalého přepětí [20]	46
Obrázek 28 Průběh dočasného přepětí [20]	47
Obrázek 29 Průběh přechodného přepětí s dlouhým čelem [20]	47
Obrázek 30 Průběh přepětí s krátkým čelem [20]	47
Obrázek 31 Průběh přepětí s velmi krátkým čelem [20]	48
Obrázek 32 Provoz sítě bez WATTrouteru [24]	50
Obrázek 33 Provoz sítě s WATTrouterem [24]	51
Obrázek 34 Analyzátor kvality v provedení ENA330 [29]	53
Obrázek 35 PQ monitor MEg38/C [26]	53
Obrázek 36 Stacionární analyzátor UP-2210 [30]	55
Obrázek 37 Místo 1 Průběh nesymetrie v časovém úseku 24.7.2017 – 31.7.2017	56
Obrázek 38 Místo 1 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 24.7.2017 – 31.7.2017	57
Obrázek 39 Místo 1 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 24.7.2017 – 31.7.2017	57
Obrázek 40 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L1 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017	58
Obrázek 41 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L2 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017	58

Obrázek 42 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L3 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017	59
Obrázek 43 Místo 1 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 25.7.2017 pro fázi L1, L2, L3	59
Obrázek 44 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017	60
Obrázek 45 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017	60
Obrázek 46 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017	61
Obrázek 47 Místo 1 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie	61
Obrázek 48 Místo 2 Průběh nesymetrie v časovém úseku 2.11.2017 – 9.11.2017	62
Obrázek 49 Místo 2 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 2.11.2017 – 9.11.2017	63
Obrázek 50 Místo 2 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 2.11.2017 – 9.11.2017	63
Obrázek 51 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L1 v čase 9.11.2017 – 9.11.2017	64
Obrázek 52 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L2 v čase 9.11.2017 – 9.11.2017	64
Obrázek 53 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L3 v čase 9.11.2017 – 9.11.2017	65
Obrázek 54 Místo 2 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 3.11.2017 pro fázi L1, L2, L3	65
Obrázek 55 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 2.11.2017 – 9.11.2017	66
Obrázek 56 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 2.11.2017 – 9.11.2017	66
Obrázek 57 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 2.11.2017 – 9.11.2017	67
Obrázek 58 Místo 2 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie	67
Obrázek 59 Místo 3 Průběh nesymetrie v časovém úseku 27.9.2017 – 4.10.2017	68
Obrázek 60 Místo 3 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 27.9.2017 – 4.10.2017	69
Obrázek 61 Místo 3 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 27.9.2017 – 4.10.2017	69
Obrázek 62 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L1 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017	70
Obrázek 63 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L2 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017	70
Obrázek 64 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L3 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017	71
Obrázek 65 Místo 3 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 28.9.2017 pro fázi L1, L2, L3	71
Obrázek 66 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017	72
Obrázek 67 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017	72
Obrázek 68 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017	73

Obrázek 69 Místo 3 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie	73
Obrázek 70 Místo 4 Průběh nesymetrie v časovém úseku 6.9.2017 – 13.9.2017	74
Obrázek 71 Místo 4 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 6.9.2017 – 13.9.2017	75
Obrázek 72 Místo 4 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 6.9.2017 – 13.9.2017	75
Obrázek 73 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L1 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017	76
Obrázek 74 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L2 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017	76
Obrázek 75 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L3 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017	77
Obrázek 76 Místo 4 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 7.9.2017 pro fázi L1, L2, L3	77
Obrázek 77 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017	78
Obrázek 78 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017	78
Obrázek 79 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017	79
Obrázek 80 Místo 4 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie	79
Obrázek 81 Místo 5 Průběh nesymetrie v časovém úseku 1.11.2017 – 8.11.2017	80
Obrázek 82 Místo 5 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 1.11.2017 – 8.11.2017	81
Obrázek 83 Místo 5 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 1.11.2017 – 8.11.2017	81
Obrázek 84 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L1 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017	82
Obrázek 85 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L2 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017	82
Obrázek 86 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L3 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017	83
Obrázek 87 Místo 5 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 2.11.2017 pro fázi L1, L2, L3	83
Obrázek 88 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017	84
Obrázek 89 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017	84
Obrázek 90 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017	85
Obrázek 91 Místo 5 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie	85
Obrázek 92 Místo 6 Průběh nesymetrie v časovém úseku 1.6.2017 – 8.6.2017	86
Obrázek 93 Místo 6 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 1.6.2017 – 8.6.2017	87
Obrázek 94 Místo 6 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 1.6.2017 – 8.6.2017	87
Obrázek 95 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L1 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017	88
Obrázek 96 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L2 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017	88
Obrázek 97 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L3 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017	89

Obrázek 98 Místo 6 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 2.6.2017 pro fázi L1, L2, L3	89
Obrázek 99 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017	90
Obrázek 100 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017	90
Obrázek 101 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017	91
Obrázek 102 Místo 6 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie	91
Obrázek 103 Místo 7 Průběh nesymetrie v časovém úseku 4.7.2017 – 11.7.2017	92
Obrázek 104 Místo 7 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 4.7.2017 – 11.7.2017	93
Obrázek 105 Místo 7 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 4.7.2017 – 11.7.2017	93
Obrázek 106 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L1 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017	94
Obrázek 107 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L2 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017	94
Obrázek 108 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro fázi L3 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017	95
Obrázek 109 Místo 7 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 5.7.2017 pro fázi L1, L2, L3	95
Obrázek 110 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017	96
Obrázek 111 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017	96
Obrázek 112 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017	97
Obrázek 113 Místo 7 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie	97

Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled s dovoleným obsahem harmonických v sítích nn/vn/vvn [2]	21
Tabulka 2 Počet poruch za rok s hloubkou poklesu a dobou trvání [1]	37
Tabulka 3 Jmenovité hodnoty napětí s nejvyšším napětím sítě [21]	46
Tabulka 4 Nejistota měření a měřící rozsahy parametrů kvality napětí PQ monitoru [27]	54
Tabulka 5 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie pro měřená místa	99
Tabulka 6 Souhrnný přehled harmonických 2. – 15. řádu pro měřená místa	100

Úvod

S elektrickou energií přicházíme do styku každý den a stala se pro nás nepostradatelnou součástí života. Nároky a potřeba elektrické energie neustále rostou, a tak je nezbytné rozvíjet a modernizovat elektrizační soustavu. S tím ale souvisí vznik rušivých vlivů, které negativně ovlivňují kvalitu parametrů elektrické energie.

V této diplomové práci se zaměříme na kvalitu parametrů elektrické energie v sítích.

První část diplomové práce teoreticky rozebere jednotlivé parametry, určující kvalitu elektrické energie. O jaké parametry se jedná, jakým způsobem vznikají, jaké jsou jejich následky a možnosti omezení.

V druhé části se budeme věnovat rozboru WATTrouteru. Rozebereme, k čemu a kde se WATTroutery používají, jejich princip a způsob ukládání energie.

Ve třetí části se zaměříme na přístroje měřící kvalitu parametrů elektrické energie. Následně provedeme rozbor analyzátorů od různých výrobců.

V poslední neboli praktické části, zhodnotíme naměřená data z různých 7 míst. K vyhodnocení budeme používat příslušné grafy s parametry nesymetrie, flikru a celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu.

1 Teoretický rozbor problematiky kvality elektrické energie

Elektrická energie se stala důležitou komoditou v dnešní době, se kterou se obchoduje a dnešní svět bez ní si už nedokážeme představit. Proto bylo potřeba stanovit parametry, podle kterých by se kvalita elektrické energie posuzovala. Parametry kvality elektrické energie vyhodnocují odchylky technických parametrů dodávané elektrickou energií nebo z celkového zásobování od hodnot dohodnutých. Odchylky parametrů jsou dány normou ČSN EN 50160 ed.3 – Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. Do těchto charakteristik patří parametry: [2][4]

- Kmitočet sítě
- Velikost napájecího napětí
- Odchylky napájecího napětí
- Rychlé změny napětí
- Krátkodobé poklesy napájecího napětí
- Krátká přerušení napájecího napětí
- Dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- Dočasná přepětí síťového kmitočtu mezi vodiči pod napětím a zemí
- Přechodná přepětí mezi vodiči pod napětím a zemí
- Nesymetrie napájecího napětí
- Harmonické napětí
- Meziharmonické napětí
- Napětí síťových signálů v napájecím napětí

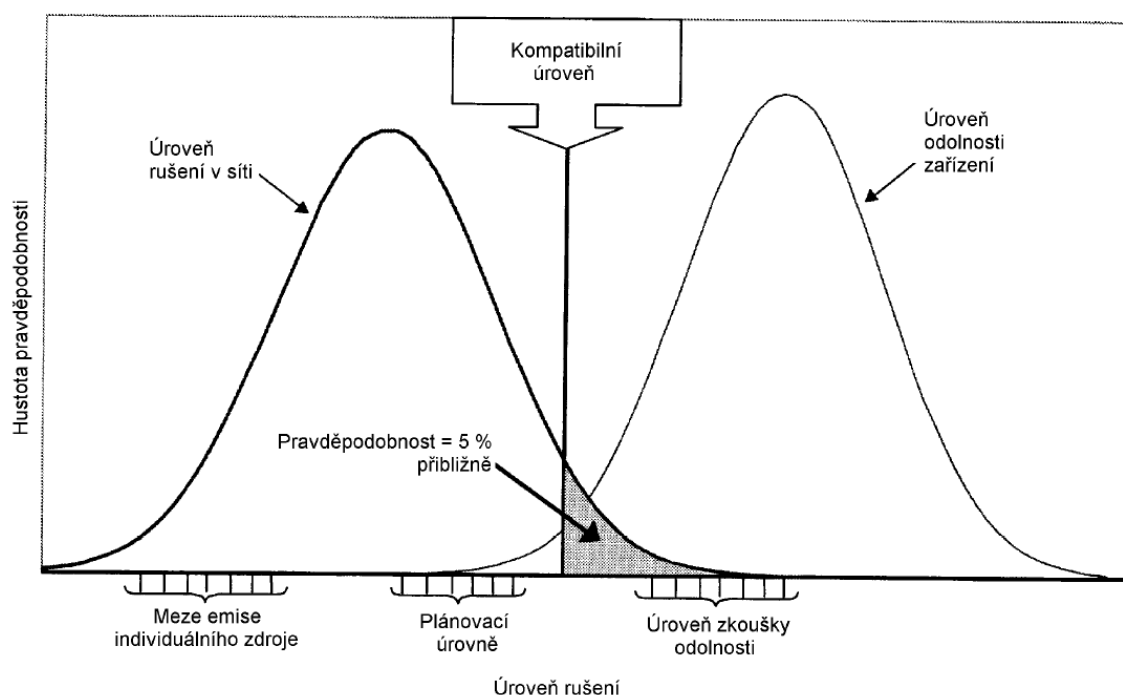
S kvalitou elektrické energie je pevně spjat energetický zákon 458/2000 Sb., podle kterého se v České republice řídíme.

1.1. Elektromagnetická kompatibilita

Každé zařízení nebo systém považujeme za zdroj rušení, ale také přijímačem tohoto rušení, tudíž musíme posuzovat, do jaké míry může být zařízení nebo systém zdrojem rušení a zároveň jakému rušení musí být schopen odolávat. Souhrnně se jedná o schopnost zařízení nebo systému fungovat v elektromagnetickém prostředí vyhovujícím způsobem. [3]

1.1.1. Elektromagnetická kompatibilní úroveň

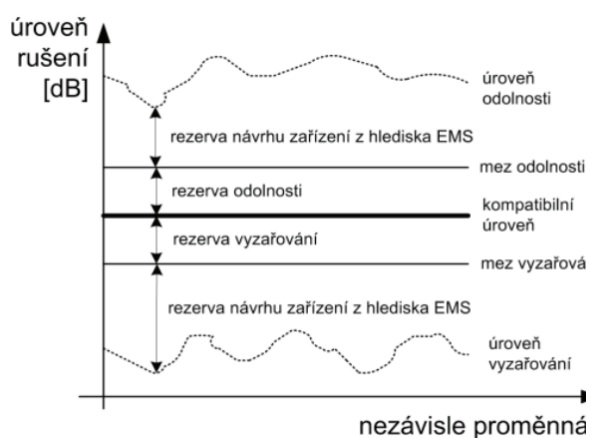
Kompatibilní úroveň stanovuje referenční hodnotu, která by měla pokrývat alespoň 95 % případů rušení a měla by sloužit k bezproblémové funkci rozvodné sítě. Přístroje a zařízení by měli mít hodnotu nejméně rovnu kompatibilní úrovni, ale doporučuje se mít hodnotu vyšší. V praxi kompatibilní úroveň není absolutní maximální hodnota, ale úroveň, která může být překročena s malou pravděpodobností. [1][3]



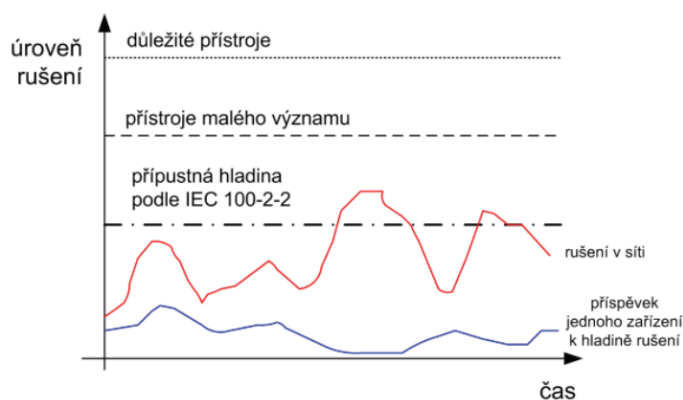
Obrázek 1 Elektromagnetická kompatibilní úroveň [1]

1.1.2. Rušení a rušivé účinky

Rušivá veličina ovlivňuje nežádoucím způsobem elektrická zařízení a pomocí ní definujeme kompatibilní úroveň a přípustnou hladinu. Podle přípustné hladiny určíme mezní velikost odolnosti proti rušení a meze vyzařování. [3]



Obrázek 2 Elektromagnetické rušení a přípustné hladiny [1]



Obrázek 3 Schéma elektromagnetického prostředí [3]

Elektromagnetické a energetické rušení představují jakékoliv elektromagnetické jevy, které může zhoršit provoz přístroje, zařízení nebo systému anebo nepříznivě ovlivnit živou nebo neživou hmotu. Energetické rušení se šíří vedením v energetické rozvodné síti. [1]

Druhy elektromagnetického (energetické) rušení rozdělujeme na:

- Harmonické
- Meziharmonické (interharmonické)
- Kolísání napětí
- Poklesy a přerušení napětí
- Nesymetrie napětí
- Přepětí

1.2. Harmonické v elektrických sítích

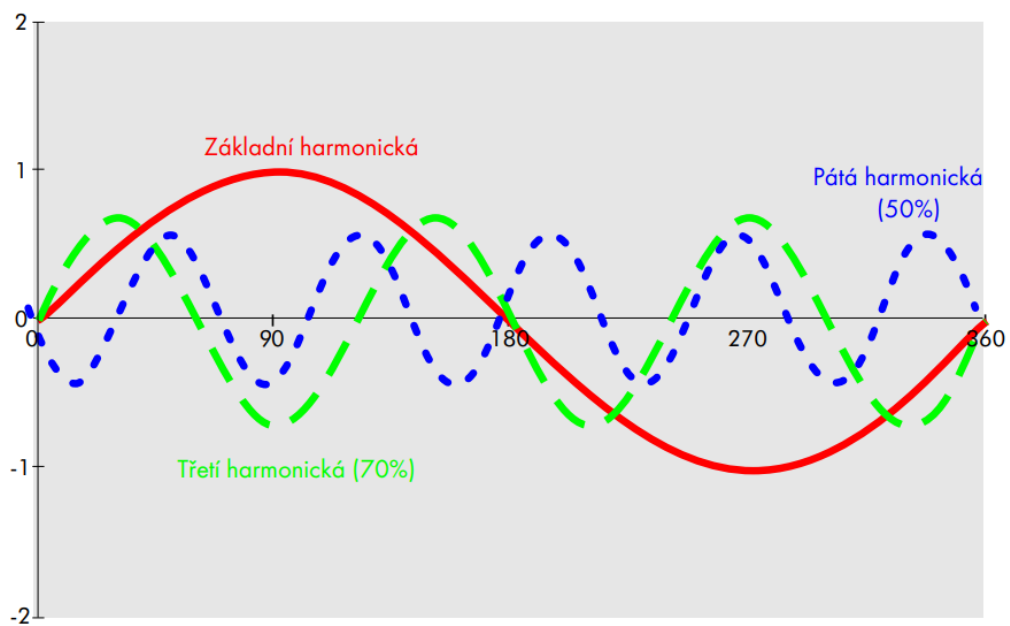
Elektrické sítě jsou zatěžovány nelineárními spotřebiči, které negativně působí na síť a odebírají z ní nesinusový zatěžovací proud, a tím dochází k deformaci sinusovky. Těmhle deformacím říkáme zpětné působení na síť nebo také vyšší harmonické. Na kvalitu elektrické energie mají největší vliv vyšší harmonické 5. a 7. řádu tedy frekvence 250 Hz a 350 Hz. V případě velkého obsahu vyšších harmonických dochází k chybnému fungování elektrických zařízení. [7]

Pokud se budeme bavit o harmonických a o působení spotřebičů na elektrickou síť, musíme zavést definici slova harmonická. Pojmy související s harmonickými jsou definovány normou ČSN IEC 50 (161). Harmonické složky proudu nebo napětí představují jednotlivé složky Fourierovi řady periodické veličiny řádu větší než 1. Harmonickou složku 1. řádu Fourierovi řady periodické veličiny nazýváme základní harmonickou. Řád harmonické h je celé číslo, dané poměrem kmitočtů harmonické a základní harmonické. [9]

$$h = \frac{f_h}{f_1}$$

Základní harmonická je hodnota frekvence napájecího napětí a vyšší harmonické jsou k-násobkem celých čísel základní harmonické. Základní frekvence používaná v ČR je 50 Hz, tím pádem bude druhou harmonickou hodnota 100 Hz, třetí 150 Hz atd. V elektrické síti může docházet k tomu, že se objevují parazitní složky proudu a napětí mezi harmonickými, které nejsou celočíselným násobkem základní harmonické. Těmhle harmonickým říkáme meziharmonické. [6]

V lineárních obvodech, které jsou buzeny z periodických zdrojů napětí a proudů, se všechny obvodové veličiny mění v čase periodicky s konstantní amplitudou a se stejnou periodou. Tohle nazýváme periodicky ustáleným stavem v elektrických obvodech. Při periodickém buzení nelineárních obvodů mohou vzniknout vlivem nelinearity samobuzené periodické kmity. Abychom mohli provést analýzu periodického ustáleného stavu, je nejprve potřeba vyjádřit periodické veličiny pomocí harmonických složek. Základem je skládání harmonických průběhů se stejným kmitočtem. Harmonické signály jsou popsány kmitočtovým spektrem, kdy jednotlivé kmitočty jsou celistvým násobkem základního kmitočtu. [3]



Obrázek 4 Základní harmonická s třetí a pátou harmonickou [8]

1.2.1. Fourierova řada

Fourierovou řadou nahrazujeme periodické průběhy k tomu, abychom dostali řadu složenou s funkcí sinus a kosinus a pokud funkce $f(x)$ vyhovuje rovnici, pak funkci nazýváme periodickou s periodou $T = 2\pi$.

$$f(x) = f(x + 2\pi) \quad \equiv \quad f(x) = f(x + k \cdot 2\pi)$$

Periodické funkce:

$\sin(\omega t)$ a $\cos(\omega t)$

$$\text{kde } x = \omega t \quad \omega = 2\pi f \quad T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$$

Dosazením ověřujeme, zdali je funkce periodická:

$$\sin \omega(t + k \cdot T) = \sin \omega \left(t + k \frac{2\pi}{\omega} \right) = \sin(\omega t + 2k\pi) = \sin \omega t$$

Ověřili jsme, že se jedná skutečně o funkci periodickou

Periodickou funkci lze aproximovat pomocí goniometrického polynomu [1]

$$\varphi_n(x) = b_0 + \sum_{k=1}^n [a_k \cdot \sin(kx) + b_k \cdot \cos(kx)]$$

Pomocí metody nejmenších čtverců [1]

$$\int_0^{2\pi} [f(x) - \varphi_n(x)]^2 \cdot dx = \int_0^{2\pi} [F]^2 \cdot dx = MIN$$

Neznámé koeficienty určíme pomocí parciálních derivací [1]

$$\frac{\partial F}{\partial b_0} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial a_k} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_k} = 0$$

Fourierovy koeficienty

$$b_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \sin(kx) dx$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \cos(kx) dx$$

Pro limitní operaci $n \rightarrow \infty$ dostaneme rozvoj ve Fourierovu řadu, přitom periodická funkce musí splňovat Dirichletovy podmínky: [1]

- Funkce musí být absolutně integrovatelná přes jednu periodu [5]

$$\int_t^{t+T} |f(t)| dt < \infty$$

- Funkce musí mít na intervalu $(t; t + T)$ konečný počet nespojitostí a konečný počet maxim i minim [5]

Úpravou dostaneme:

$$f(x) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \sin(nx) + b_n \cdot \cos(nx)]$$

Pro časovou řadu s periodou T

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \sin(n\omega t) + b_n \cdot \cos(n\omega t)]$$

Posloupnost amplitud jednotlivých harmonických složek nazýváme amplitudovým spektrem a posloupnost jejich fází fázovým spektrem. Pomocí těchto spekter můžeme zapsat Fourierovy řady v komplexním tvaru. [1]

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \cos(n\omega t - \varphi_n)$$

Koeficienty Fourierovy řady

$$c_0 = b_0$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\varphi_n = \arctg\left(\frac{a_n}{b_n}\right)$$

Pomocí komplexních členů

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} c_n \cdot e^{n \cdot j\omega t}$$

$$\text{kde } c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-n \cdot j\omega t} \cdot dt$$

1.2.2. Výkony při neharmonických průbězích

Pro sinusové průběhy

$$\text{Zdánlivý výkon } S = U \cdot I$$

$$\text{Činný výkon } P = S \cdot \cos \varphi$$

$$\text{Jalový výkon } Q = S \cdot \sin \varphi$$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$\text{Účinnost } \cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Pro nesinusové průběhy

$$\text{Zdánlivý výkon } S = U_{ef} \cdot I_{ef} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots} \cdot \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots}$$

$$S^2 = \sum U_k^2 \cdot I_k^2 + \sum U_i^2 \cdot I_j^2$$

$$\text{Činný výkon } P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt = \sum U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k$$

$$\text{Jalový výkon } Q = \sum U_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k$$

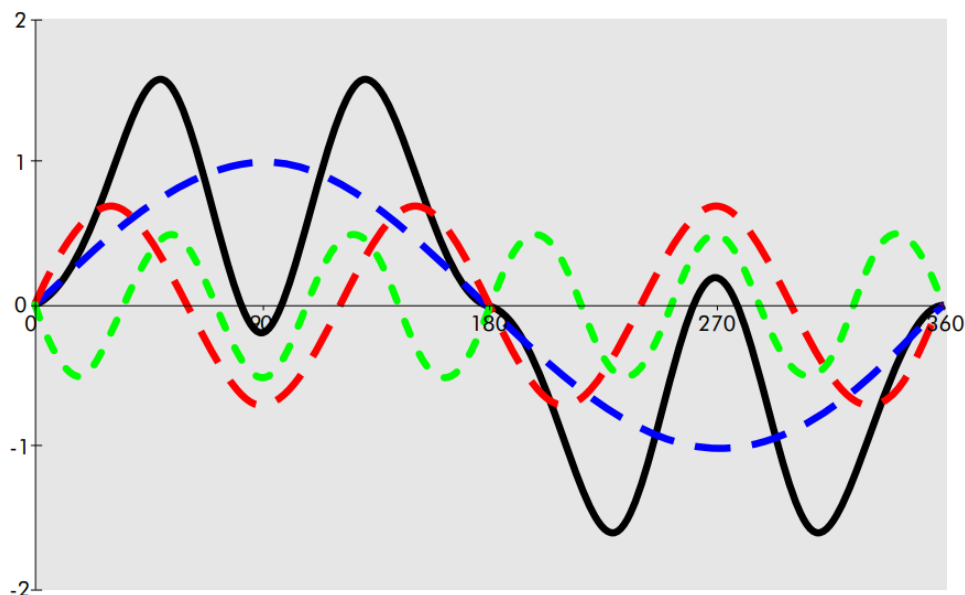
$$\rightarrow P^2 + Q^2 = \sum U_k^2 \cdot I_k^2$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + \sum U_i^2 \cdot I_j^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

$$\text{Deformační výkon } D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

$$\text{Skutečný účinnost } \lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

Deformační výkon společně s jalovým výkonem představuje neužitečnou složku zdánlivého výkonu, které nám způsobuje zvýšení ztrát v síti. Deformační výkon vzniká díky vyšším harmonickým. Pro nesinusové průběhy zavádíme tzv. skutečný účinník, protože účinník $\cos \varphi$ by byl nedostatečný a nezahrnuje do výpočtu deformační výkon.



Obrázek 5 Deformovaný časový průběh proudu [8]

Ve skutečnosti časové průběhy nejsou pouze sinusové, což by znamenalo při měření například efektivní hodnoty, že multimetr nebude měřit správně. Z obrázku jde vidět, že deformovaný průběh proudu obsahuje více průchodu nulou za jednu periodu místo obvyklých dvou. A také musíme brát v úvahu, že takový průběh obsahuje i jiné harmonické než jen pouze základní. [8]

Pokud se více zaměříme na harmonické v elektrických sítích, zajímá nás hlavně proud, protože jeho působením vznikají další harmonické proudy a ty jsou zdrojem většiny negativních vlivů na síť. Bez znalosti spektra harmonických proudů nemůžeme provádět žádné korektní závěry a vyhodnocování. Velmi často se pro charakterizování obsahu harmonických používá celkové harmonické zkreslení (THD). Pokud nejsou jednotlivé větve obvodů navrženy s ohledem na výskyt harmonických proudů, dochází k šíření harmonického napětí. Velice důležité je, že napětí i proud je měřitelný, a tím tedy jsou hodnoty jednoznačně definovány jako napětí a proud. Celkové harmonické zkreslení proudu označujeme např. 35 % THDI a celkové harmonické zkreslení napětí označujeme např. 4 % THDU. [8]

1.2.3. Veličiny charakterizující obsah harmonických v elektrické síti

Činitel harmonických – THF – poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických střídavé veličiny k efektivní hodnotě této veličiny, přičemž obsah harmonických je veličina získána tak, že se od střídavé veličiny odečte její základní harmonická [1]

$$THF = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots}}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}}$$

Celkové harmonické zkreslení – THD – poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických střídavé veličiny k efektivní hodnotě základní harmonické této veličiny [1]

$$THD = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots}}{A_1}$$

Celkové harmonické zkreslení proudu

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}}{U_1}$$

Celkové harmonické zkreslení napětí

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (I_h)^2}}{I_1}$$

U_h - efektivní hodnota napětí jednotlivých harmonických

I_h - efektivní hodnota proudu jednotlivých harmonických

h - řád jednotlivých harmonických složek

U_1 - efektivní hodnota napětí první harmonické

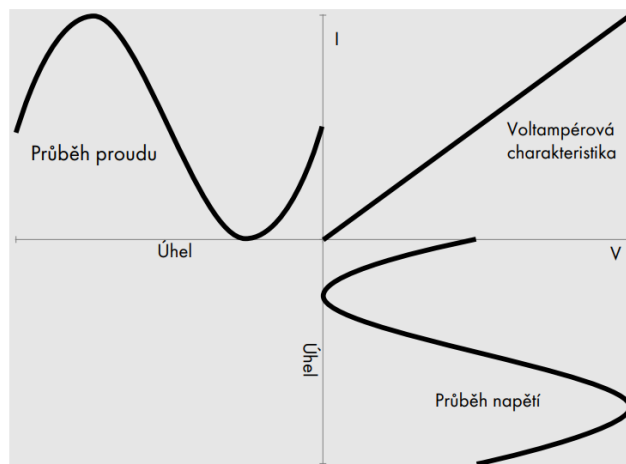
I_1 - efektivní hodnota proudu první harmonické

Tabulka 1 Přehled s dovoleným obsahem harmonických v sítích nn/vn/vvn [2]

Liché harmonické				Sudé harmonické	
Ne násobky 3		Násobky 3			
Řád harmonické h	Harmonické napětí U_h [%]	Řád harmonické h	Harmonické napětí U_h [%]	Řád harmonické h	Harmonické napětí U_h [%]
5	6/6/5	3	5/5/3	2	2/2/1,9
7	5/5/4	9	1,5/1,5/1,3	4	1/1/1
11	3,5/3,5/3	15	0,5/0,5/0,5	6....24	0,5/0,5/0,5
13	3/3/2,5	21	0,5/0,5/0,5		
17	2/2/zkoumá se				
19	1,5/1,5/zkoumá se				
23	1,5/1,5/zkoumá se				
25	1,5/1,5 zkoumá se				

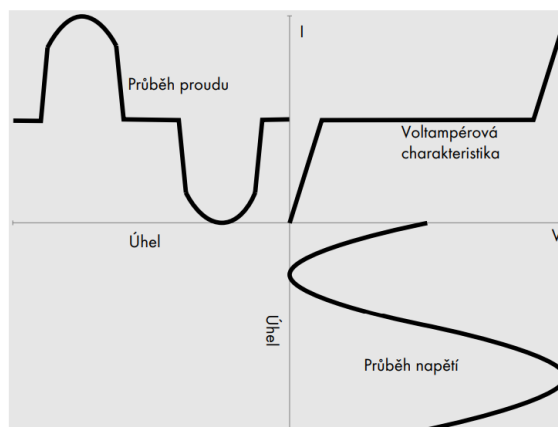
1.2.4. Generování harmonických

V ideálním případě má elektrický systém proud i napětí čistě sinusový tvar. V praxi však tohle není možné, protože nám důsledkem průchodu proudu nelineární zátěží napájené sinusovým napětím vznikají nesinusové proudy. V jednoduchém obvodu, ve kterém jsou zastoupeny pouze lineární prvky jakožto odpor, indukčnost a kapacita, je proud, který protéká obvodem přímo úměrný napájecímu napětí. V případě, že napájecí napětí má sinusový průběh, pak bude obvodem protékat sinusový proud. Závislost mezi napájecím napětím a proudem vyjadřujeme voltampérovou charakteristikou, která je na obrázku 6. Pokud se v obvodu vyskytuje reaktanční prvek, vzniká fázový posun mezi napětím a proudem, ale obvod má stále lineární charakter. [8]



Obrázek 6 Časový průběh proudu lineární zátěží [8]

Jiná situace nastává, pokud v obvodu máme nelineární prvky, které generují vyšší harmonické. Tímto generátorem je například jednoduchý dvoucestný usměrňovač s kondenzátorem. Kondenzátorem začne procházet proud pouze v případě, když napájecí napětí překročí napětí na kondenzátoru tzn. sinusové napětí se blíží špičkové hodnotě. Voltampérová charakteristika je tedy nelineární. Většinou je průběh proudu mnohem složitější, než je na obrázku 7, protože se můžou objevit asymetrie a hystereze, které změní body zlomu a sklonu. [8]



Obrázek 7 Časový průběh proudu nelineární zátěží [8]

Zdeformovaný průběh proudu může být rozložen do sinusovky reprezentovanou základní frekvencí s obsahem druhé až třicáté harmonické. Harmonické rozdělujeme na liché a sudé. Sudé harmonické jsou nulové, pokud kladná a záporná půlperioda má stejný tvar a velikost a zároveň tzv. symetrickou křivkou. Díky častému používání jednocestného usměrňovače byly v minulosti sudé harmonické běžné, teď už tomu tak není a vyskytují se velice ojediněle. [8]

Nelineární obvod se může upravit pomocí lineárních zátěží paralelně s několika proudovými zdroji, kde každý zdroj reprezentuje harmonickou frekvenci. Průchodem harmonického proudu obvodem přes impedance zdroje a přes všechny paralelní větve dochází ke vzniku úbytku napětí, které následně vedou k deformaci původního sinusového průběhu napětí. [8]

Pokud zkoumáme nebo ověřujeme existenci harmonické, vždy musíme měřit proud. Je to dáno tím, že impedance zdrojů jsou velmi malé a tím i zkreslení harmonického napětí harmonickým proudem, a tedy obtížně pozorovatelné vůči pozadí sítě. [8]

1.2.5. Problémy způsobené harmonickými

V elektrických sítích a v elektroinstalacích harmonické proudy způsobují problémy. Řešení těchto problémů vyžaduje individuální přístup. K tomu nám napomáhá měření, které slouží k řízení vlivů v elektroinstalacích, ale nemusí to vždy vést k snížení harmonického zkreslení. [8]

Problémy způsobené harmonickými proudy

- Přetížení středního vodiče
- Přehřátí transformátoru
- Rušení při spínání vypínačů
- Přetěžování kompenzačních kondenzátorů
- Skinefekt

Problémy způsobené harmonickými napětími

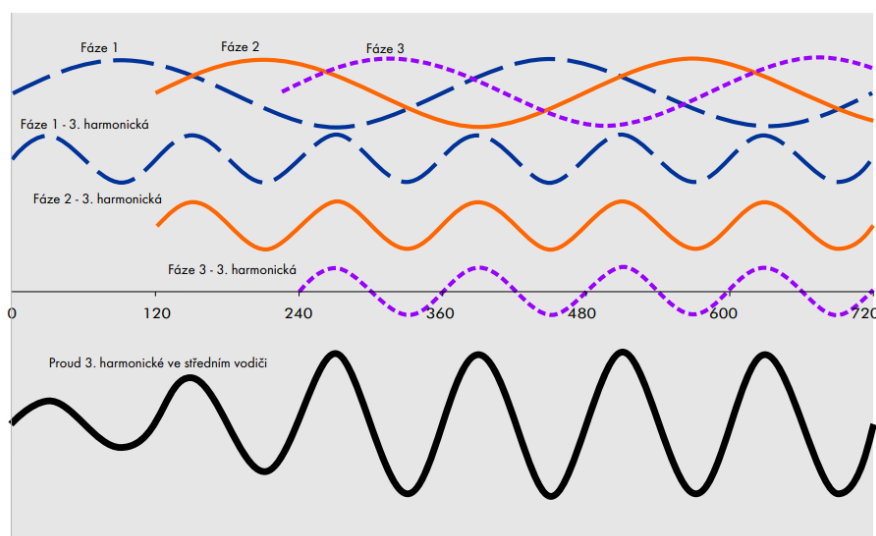
- Harmonické zkreslení napětí
- Indukční motory
- Poruchy při průchodu nulou

Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti

1.2.5.1. Problémy způsobené harmonickými proudy

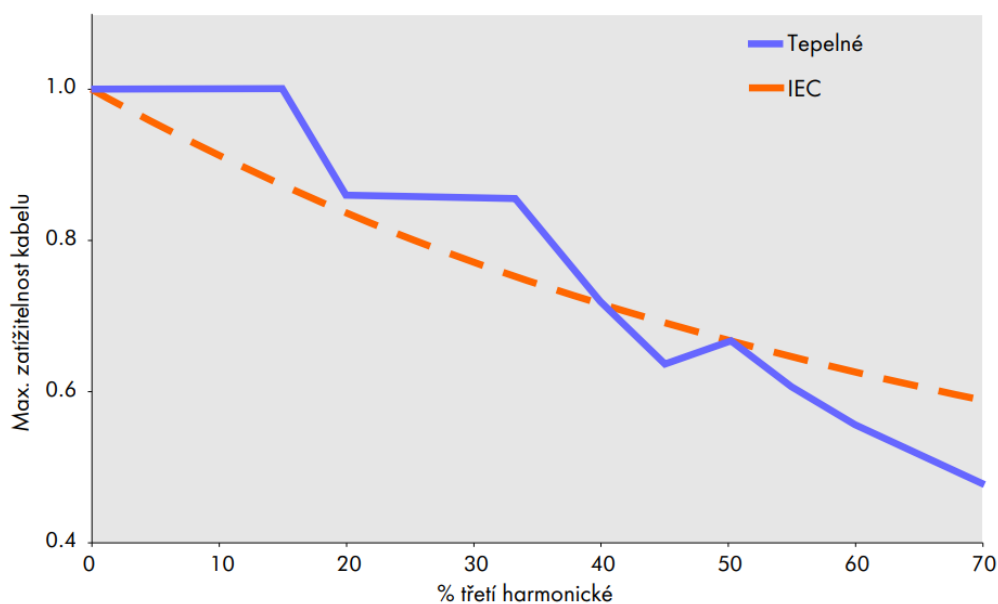
1.2.5.1.1. Přetížení středního vodiče

Fázová napětí v trojfázové síti jsou vůči sobě posunuta o 120° a středním vodičem neprotéká žádný proud v případě stejného zatížení všech tří fází. Pokud nastává, že jednotlivé fáze nejsou symetricky zatíženy, středním vodičem prochází proud a jeho velikost je dána součtem fázových proudů. Tyto proudy jsou menší než proudy fázové. Vzhledem k této skutečnosti se začali střední vodiče pro trojfázové rozvody navrhovat s nižším průřezem. Když zatížíme všechny fáze stejně, proud základní harmonické se ve středním vodiči neobjeví. To stejné ale nemůžeme říci o proudech vyšších harmonických, které se ve středním vodiči sčítají. Jedná se o proudy třetí harmonické a jejich násobky $3n$. Obrázek nám reprezentuje vyšší harmonické ve fázích a jejich výsledný proud ve středním vodiči. Velikost proudu vyšších harmonických v jednotlivých fázích dosahuje amplitudy 70 %, z toho vyplývá, že ve středním vodiči může dojít k nárůstu fázového proudu až na 210 %. [8]



Obrázek 8 Sčítání $3n$ harmonických proudů ve středním vodiči [8]

S tímto faktem je potřeba při projektování počítat. Jedna z možností je například navrhnout střední vodič s dvojnásobným průřezem nebo dva paralelní vodiče o stejném průřezu jako vodiče fázové. U více žilových kabelů je situace komplikovanější. Opět předpokládáme symetrické zatížení všech fází a středním vodičem neprochází žádný proud. Zatížitelnost kabelů je převážně limitována oteplením na maximální dovolenou mez. Nesmíme zapomenout na proudy vyšších harmonických násobků $3n$, které mají negativní vliv na zatížitelnost. Obrázek znázorňuje přepočty zatížení kabelů pro harmonické proudy $3n$. [8]



Obrázek 9 Přepočet zatížení kabelu pro 3n harmonickou [8]

1.2.5.1.2. Přehřátí transformátoru

Vyšší harmonické ovlivňují transformátory dvěma způsoby. Prvním z nich jsou ztráty vířivými proudy, které se za normálních okolností pohybují okolo 10 % při plném zatížení. Ztráty rostou s kvadrátem řádu harmonických. Jestliže plně zatížený transformátor zatížíme nelineární zátěží, pak celkové ztráty budou dvojnásobné oproti zatížení s lineární zátěží. Nelineární zatížení se projeví na vyšší provozní teplotě a kratší životnosti. Prakticky se můžeme dostat ze 40 let životnosti na 40 dní. Tento jev nastává pouze u plně zatížených transformátorů, kterých není moc. [8]

Druhý způsob ovlivnění transformátoru je spojen s 3n harmonickými. Transformátor zapojený do trojúhelníku se chová pro 3n harmonické jako izolační, protože harmonické jsou ve fázi, a tím se uzavírají ve vinutí a do napájecí sítě se nešíří. To neplatí pro harmonické jiných řádů, které transformátorem prochází. Při stanovení jmenovitého zatížení transformátoru se musí brát v úvahu harmonické proudy 3n. [8]

1.2.5.1.3. Rušení při spínání vypínačů

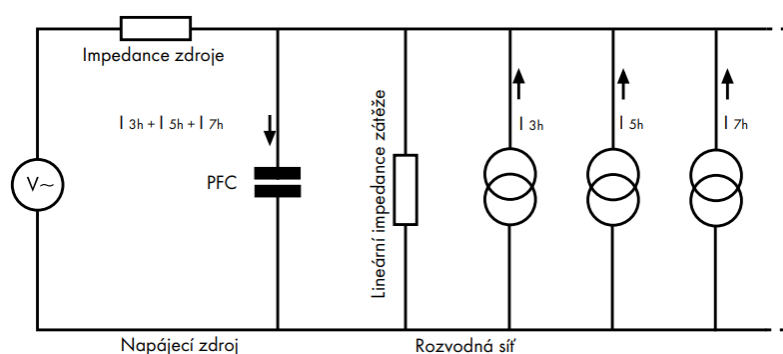
Vypnutí proudového chrániče nastává, když součet proudů ve fázových vodičích a ve středním vodiči překročí dovolenou mez. Vlivem vyšších harmonických může docházet k rušení při spínání vypínačů.

V prvním případě může k chybnému vypnutí dojít, protože vypínače, jakož to elektromechanická zařízení, nemusí přesně počítat harmonické složky proudů. V druhém případě některé zařízení generují harmonické a také generují spínací poruchy. Proto v napájecím obvodu zapojujeme kondenzátory mezi fázi, střední vodič a zem, které slouží jako filtr. Filtrem tak teče malý svodový proud do země. Minimální hodnotu tohoto proudu udává norma, a to velikost menší než 3,5 mA, ale ve skutečnosti je hodnota mnohem nižší. Problém nastává, jestliže je filtr připojen pouze do jednoho obvodu a svodový proud překročí hodnotu 3,5 mA a způsobí vypnutí. Řešením je využití více obvodů, z nich každý napájí více zátěží. [8]

Rušení při spínání miniaturních vypínačů je převážně způsobeno tím, že vlivem harmonických prochází proud s větší hodnotou, než bylo vypočteno nebo změřeno. Je to dáno tím, že spousta měřících přístrojů neměří efektivní hodnotu správně a měření je nepřesné. [8]

1.2.5.1.4. Přetěžování kompenzačních kondenzátorů

Filtry neboli kompenzační kondenzátory slouží ke kompenzaci fázového posunutí zpožděného proudu indukivní zátěže. Náhradní schéma s kompenzačním kondenzátorem a společně s nelineární zátěží je na obrázku 10. Ze znalostí vzorců pro indukivní a kapacitní reaktanci víme, že impedance kondenzátoru (kapacitní charakter) s rostoucí frekvencí klesá a impedance sítě (induktivní charakter) s rostoucí frekvencí roste. Proto kondenzátor v náhradním obvodu je více zatěžován harmonickými proudy vyšších řádů. Kondenzátor musí být individuálně dimenzován, aby nedošlo k jeho poškození. [8]



Obrázek 10 Náhradní schéma pro nelineární zátěž a kompenzační kondenzátor [8]

Pozornost musíme věnovat rezonanci kapacity kondenzátoru a indukčnosti napájecí sítě okolo harmonických kmitočtů 100 Hz. V blízkosti těchto hodnot napětí a proudy dosahují velkých hodnot. Zapojením tlumivky do série ke kondenzátoru můžeme eliminovat rezonanční jev, aby celková impedance byla indukivní pro nejmenší výraznou harmonickou. Tímto docílíme omezení toku harmonického proudu do kondenzátoru. Volba velikosti tlumivky může být problematická, a to z důvodu přítomnosti harmonických nízkých řádů. [8]

1.2.5.1.5. Skin efekt

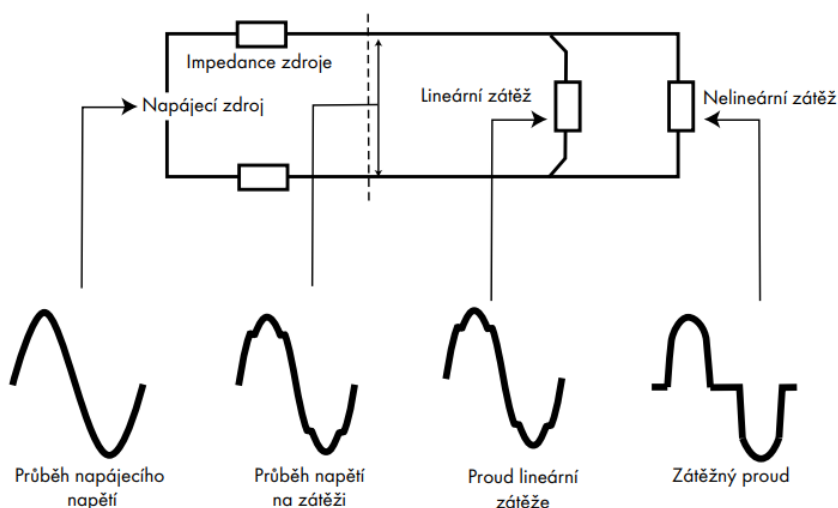
Skin efekt je jev, při kterém dochází k vytlačování střídavého proudu do okrajových ploch vodiče a projevuje se hlavně při vyšších frekvencích. V normálních případech se skin efektem nezabýváme, protože při frekvenci 50 Hz nemá velký vliv. Ale pokud se budeme bavit o frekvencích nad 350 Hz, což odpovídá 7. harmonické a výše, tak skin efekt už není zanedbatelný. Projevuje se to přídatnými ztrátami a oteplením. [8]

1.2.5.2. Problémy způsobené harmonickým napětím

1.2.5.2.1. Harmonické zkreslení napětí

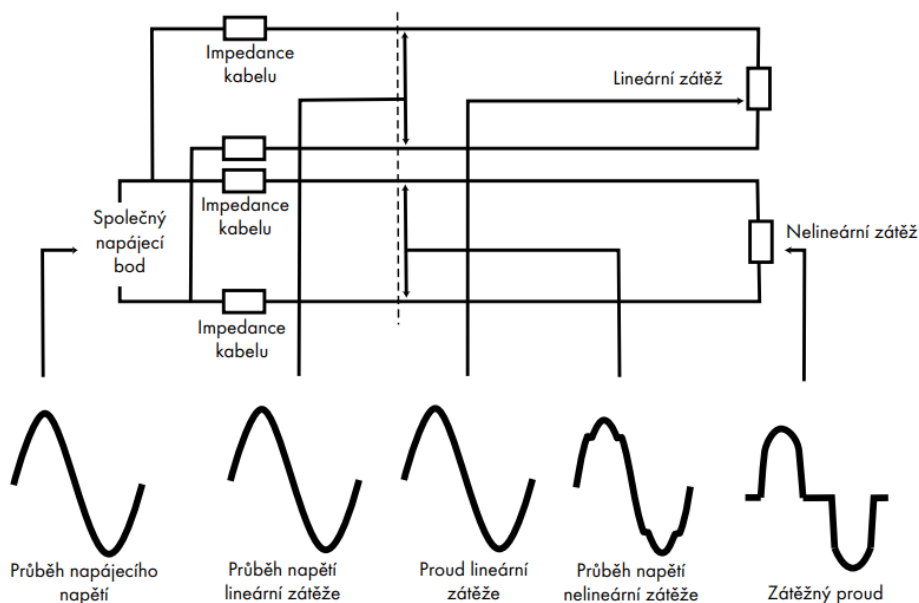
Průchodem harmonického proudu zátěží vznikají napěťová zkreslení na impedanci napájecí sítě. V napájecí síti rozlišujeme dvě impedance. Impedanci vnitřního kabelu od společného napájecího bodu a základní impedanci napájecí sítě k společnému napájecímu bodu.

V obvodu s připojenou nelineární zátěží protéká zdeformovaný odběrový proud, který způsobuje zdeformované úbytky napětí na impedancích kabelů. Výsledné napětové zkreslení, které je dáno zdeformovanými úbytky napětí, se promítne do všech ostatních připojených zátěží, a to včetně lineárních. Náhradní schéma a průběhy v daném úseku obvodu zobrazeny na obrázku 11.[8]



Obrázek 11 Zkreslení napětí vlivem nelineární zátěže [8]

Jedním z možných řešení, je oddělení obvodů generující harmonické proudy (nelineární zátěž) od obvodů náchylné na harmonické (lineární zátěž). Situace je znázorněna na obrázku 12, kde máme dva oddělené obvody napájené ze společného napájecího bodu. Tím pádem se napětové zkreslení nepřenese do obvodu s lineární zátěží. [8]



Obrázek 12 Oddělení lineární a nelineární zátěže [8]

1.2.5.2.2. Indukční motory

Podobně jako u transformátorů i zde ztráty vířivými proudy narůstají s napětovým zkreslením. Vlivem generování harmonických polí ve statoru, kde každé pole se snaží otáčet motorem rozdílnou rychlostí dopředu nebo dozadu, vznikají přídavné ztráty. Ztráty dále vznikají indukovanými proudy do rotoru na vyšších kmitočtech. Motory musí být dimenzovány s uvažováním přídavných ztrát, pokud se očekává harmonické zkreslení napětí. [8]

1.2.5.2.3. Poruchy při průchodu nulou

Většina elektronických regulátorů vypíná zátěž, když napájecí napětí prochází nulou. Vypnutí induktivní zátěže v okamžiku průchodu nulou nemá za následek vznik přechodových jevů, snižuje se elektromagnetická interference a namáhání polovodičových spínacích zařízení. V případě, že se objeví v napájecím napětí harmonické nebo přechodné jevy, dochází k nepravdělnému provozu regulátorů, co může vést k několika průchodům nulou během jedné půlperrody. [8]

1.2.5.3. Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti

Pokud harmonický proud pochází z napájecí sítě, potom dochází ke zvyšování harmonického zkreslení napětí úměrné impedanci napájecí sítě ve společném napájecím bodě a harmonickému proudu. Napájecí síť má induktivní charakter, a tak se zvyšující se frekvencí roste impedance sítě. Jestliže se v napájecí síti objeví harmonický proud, který deformuje napětí, tak potom tedy, každý další spotřebič přispívá k tomuto deformování. Na deformování mají vliv nelineární spotřebiče společně se zkreslením příslušných transformátorů. Proto se přistoupilo k tomu, aby zákazníci nemohli zvyšovat znečištění sítě, které by vedle ke snížení kvality elektrické energie vůči jiným zákazníkům. [8]

1.2.6. Možnosti omezení harmonických

Možnosti omezení harmonických rozdělujeme na tři skupiny:

- Pasivní filtry
- Transformátory pro izolaci a redukci harmonických
- Aktivní filtry

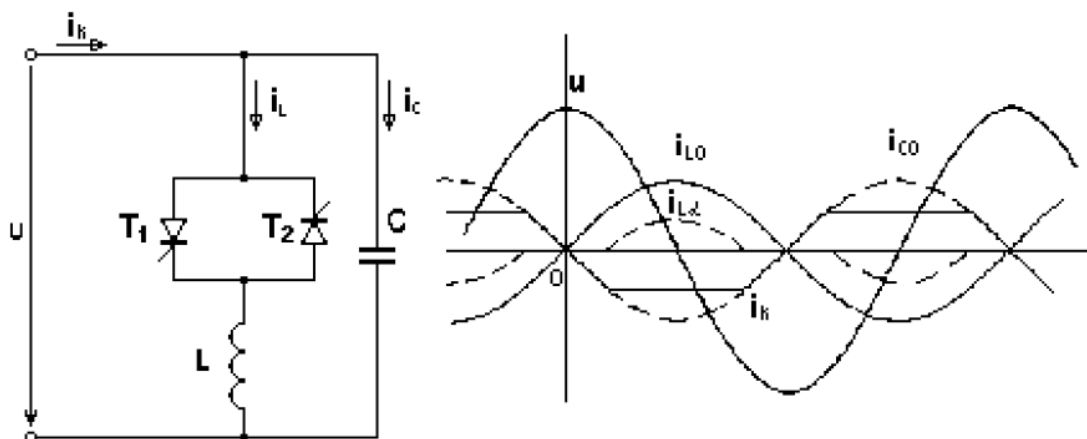
Neexistuje jediná správná metoda pro omezení harmonických, ale vždy je potřeba přistupovat k návrhu individuálně.

1.2.6.1. Pasivní filtry

1.2.6.1.1. Plynulé řízení

Plynulé řízení můžeme provést pomocí fázově řízených tyristorových spínačů v antiparalelním zapojení. Proud procházející tlumivkou regulujeme od nulové hodnoty až do plné hodnoty dané impedance tlumivky. Pokud budeme chtít řídit kapacitní proud, k původnímu obvodu paralelně připojíme kondenzátor. Problém nastává při spínání kondenzátorů antiparalelním zapojením tyristorů, kdy se objevují přepětové jevy. Tento nežádoucí jev odstraníme trvalým zapojením indukčnosti a kapacity a kompenzační výkon regulujeme pomocí úhlu zpoždění sepnutí tyristorů. [10]

Jak už bylo zmíněno, obvod regulujeme úhlem zpoždění tyristorů. Při maximálním otevření, kdy úhel je roven 0, prochází stejně velký proud kapacitou i indukčností a kompenzační výkon je nulový. Naopak při zvyšování úhlu neboli zavírání tyristoru, prochází větší část proudu kapacitou, což se projeví kapacitními proudy a kompenzátor začne kompenzovat. Schéma zapojení kondenzátoru, tlumivky, antiparalelních tyristorů a průběhy proudu a napětí jsou zobrazeny na obrázku 13. [10]



Obrázek 13 Schéma pro fázové řízení proudu při indukivní zátěži a časový průběh proudů indukčností a kapacitou [10]

V současné době s kompenzací účinníku je spojena filtrace vyšších harmonických napětí a proudů. Kompenzační kondenzátory jsou nahrazeny filtry příslušných vyšších harmonických (sériové pasivní filtry).

1.2.6.1.2. Sériová kombinace LC filtru

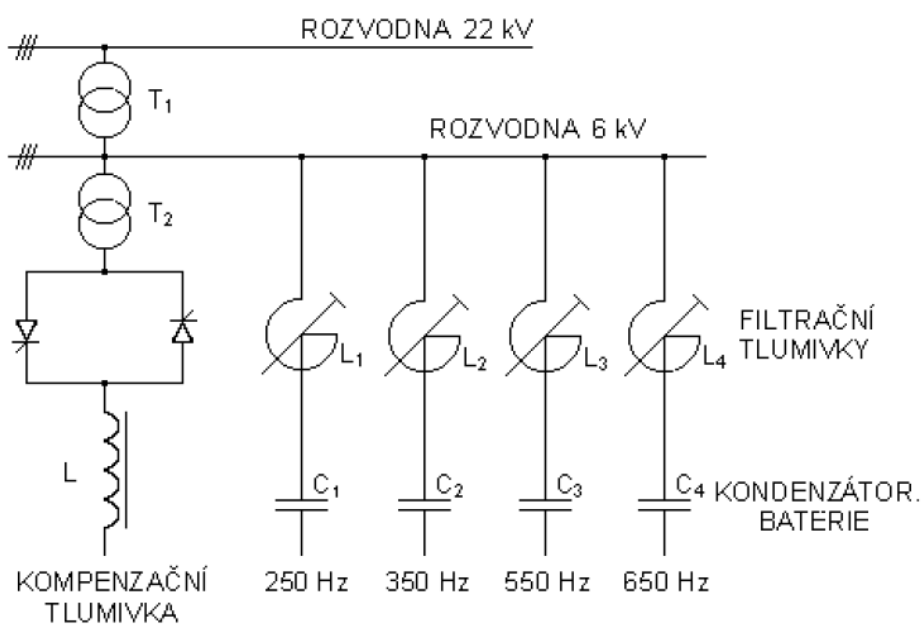
Pasivní filtry se skládají z odporů, indukčnosti a kapacity a v obvodu tvoří rezonanční obvod. Pro omezení harmonických se používají filtry zapojeného do série nebo paralelní kombinace. V našem případě uvažujeme pouze sériovou kombinaci. Sériové rezonanční obvody jsou navrhnuté na určitou harmonickou, na kterou byly vyladěny. Důležitým parametrem je rezonanční kmitočet, který určuje, při jaké frekvenci dochází k rezonanci a v obvodu uvažujeme pouze odpor. [6]11]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Pokud v obvodu dojde k rezonanci, reaktance jsou shodné a harmonické proudy dané frekvence jsou zkratovány. Proto se u pasivních filtrů snažíme udržet tzv. nízkou impedanční cestu. Filtr má kapacitní charakter pro frekvenci nižší než harmonické a zároveň jsou prostředkem pro kompenzaci účinníku. Pro vyšší frekvence než rezonanční má induktivní charakter. Hlavní funkcí filtru je tedy snížit velikost harmonického proudu, který vzniká v zátěži a šíří se zpět směrem ke zdroji a pasivnímu filtru. Průchodem harmonického proudu přes impedanci vzniká harmonické napětí, které vede k napětovému zkreslení na zdroji. [6]11]

1.2.6.1.3. Možnost zapojení filtrační kompenzační baterie

Jedná se o kombinaci antiparalelního zapojení tyristorů s kompenzační tlumivkou a k nim paralelně připojené sériové LC filtry, navrhnuté na určitou frekvenci. Obvod taktéž slouží pro kompenzaci jalového proudu. Princip funkce tohoto obvodu je obdobný jak u plynulého řízení, tak u sériových LC filtrů. Využíváme úhlu zpoždění tyristorů k regulaci proudu procházejícího tlumivkou od nulových hodnot až po hodnotu maximální impedance tlumivky. Filtry jsou navrhnuté na určité harmonické, které filtrují. K regulaci kapacitních proudů neboli ke kompenzaci nám slouží právě tyto filtry pro danou harmonickou. Doporučuje se použít pro každou fázi kompenzační filtr na 5, 7, 11 a 13 harmonickou. Také nesmíme zapomenout na správné dimenzování kompenzačního filtru, abychom nesnížili dobu životnosti, její funkčnost a spolehlivost. [6][10]



Obrázek 14 Schéma filtrační kompenzační baterie [10]

1.2.6.2. Aktivní filtry

1.2.6.2.1. Plynulé řízení

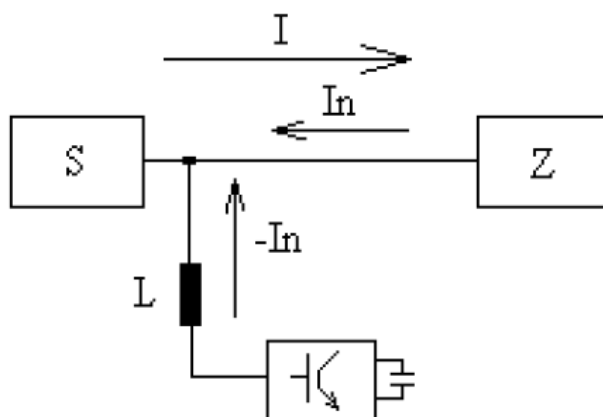
Aktivní filtry si můžeme představit jako generátory řízené vhodným regulačním systémem zapojené paralelně nebo sériově. Kompenzace harmonických složek musí být zajištěna i v dynamických stavech. Filtry dělíme na sériové, paralelní nebo kombinované. Podle tohoto způsobu dělení se pak rozlišuje při zapojení filtru do sítě, zdali filtrujeme harmonickou proud, napětí nebo obojího. [10]

1.2.6.2.2. Paralelní aktivní filtry

Řízený generátor proudu připojený paralelně k zátěži vytváří paralelní aktivní filtr. Filtr analyzuje harmonické proudy na straně zátěže, a tím vytváří tytéž harmonické stejné velikosti opačného směru, které následně přivádíme z filtru do sítě. Přiváděním těchto proudů do sítě filtrujeme odebíraný proud ze sítě, a tím tedy zdroj dodává základní proud. Rovněž tím zlepšujeme zdeformované napětí způsobené zátěží. [10]

Tímto způsobem je možné provádět selektivní kompenzaci podle okamžitých výskytů harmonických složek bez toho, aniž by nastala rezonance. Filtr má schopnost generováním jalové složky první harmonické proudu uskutečnit rychlou kompenzaci jalového proudu anebo případně pomocí sousledných a nesousledných složek upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou. [10]

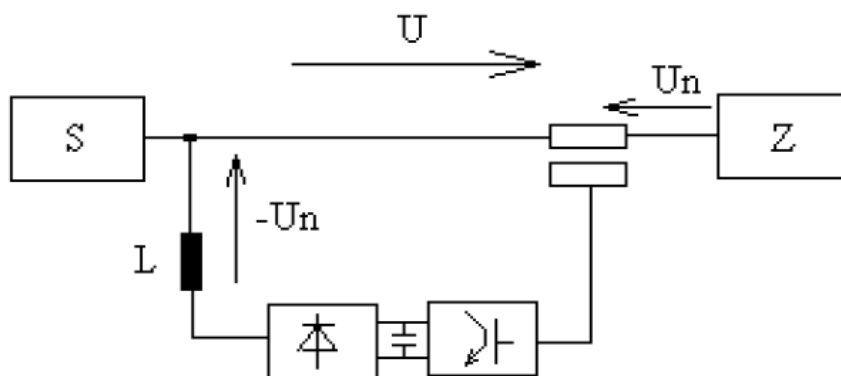
Generátory napětí nebo proudu můžou být tvořeny můstkovým zapojením IGBT. Používá se zdroj napěťový nebo proudový společně s šesti spínači pro třífázové provedení. Nicméně v praxi se ujmul napěťový zdroj s kondenzátory. U můstkového zapojení můžeme docílit požadovaného tvaru proudu vhodným spínáním tranzistorů. To je ovšem spjato s generováním harmonických v oblasti spínací frekvence. Proto je zapotřebí mezi vývody aktivního filtru a napájecí síť připojit pasivní filtr pracující v oblasti dolní propusti. Dolní propust propouští nízké frekvence a vysoké zadržuje. [10]



Obrázek 15 Paralelní aktivní filtr připojený do sítě [1]

1.2.6.2.3. Sériové aktivní filtry

Sériový aktivní filtr se skládá z generátoru napětí a je zapojen mezi svorky sítě a svorky zátěže. Schopností filtr je upravovat přivedené napětí na požadovaný tvar. Stejně jako u paralelního filtru, kde upravujeme proud, tak u sériového upravujeme napětí. Pod pojmem úpravou napětí se rozumí schopnost filtru udržet amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky, odstraňovat harmonické, zajistit symetrické rozložení napětí a v případě výpadku být zdrojem energie. Podmínka chovat se jako zdroj, je splněna pouze za předpokladu napájení filtru z nezávislého zdroje. [10][11]

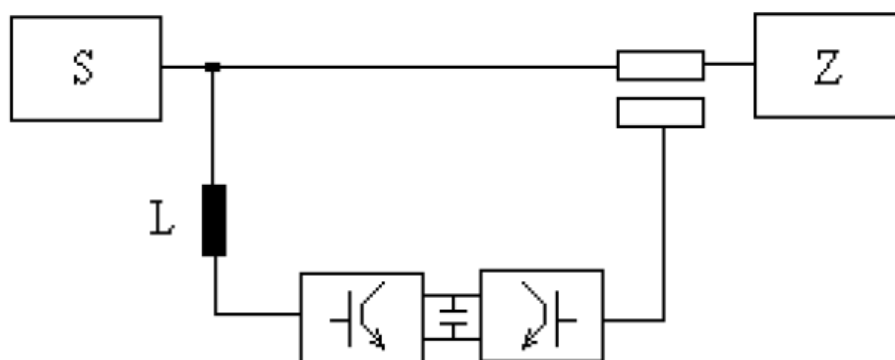


Obrázek 16 Sériový aktivní filtr připojený do sítě [1]

Z rozboru paralelního a sériového aktivního filtru plyne, že paralelní filtry dodávají do sítě harmonické proudy stejné velikosti, ale opačného směru, což vede k vyrovnávání rušivých účinků zátěže, a tedy k úpravě vlastností sítě směrem od zátěže ke zdroji. U sériového filtru taktéž dochází ke zlepšení vlastností sítě, ale směrem od napájecí strany k zátěži. Tím se do zátěže dodává kvalitnější napětí. [10]

1.2.6.3. Kombinované aktivní filtry

Kombinací dvou předchozích filtrů v jeden celek dosáhneme vhodného napětí v místě připojení filtru a požadovaného průběhu proudu. [10]



Obrázek 17 Kombinované filtry připojené do sítě [1]

1.3. Meziharmonické (interharmonické)

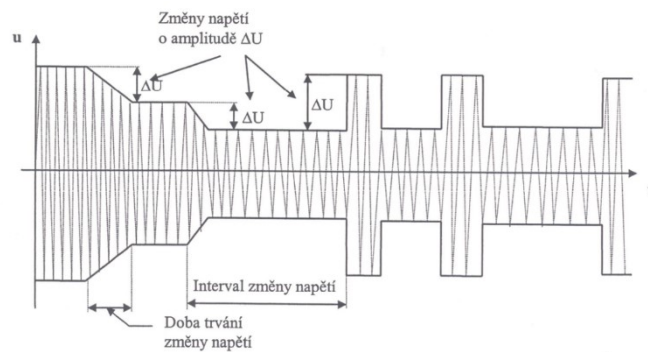
Jak už bylo zmíněno, v sítích se objevují harmonické složky napětí nebo proudu, které mají negativní dopad na síť. Nesmíme ale zapomenout, že může docházet ke vzniku meziharmonických napětí nebo proudů, u nichž není kmitočet celočíselným násobkem kmitočtu základního. Meziharmonické působí na síť a přenášející se do vyšších nebo nižších napěťových hladin. Je to dáno hladinou, kde se meziharmonické generují. Mezi základní zdroje generující meziharmonické patří elektrické obloukové pece, svářečky nebo měniče. Velikosti meziharmonických většinou nepřesahují 0,5 % základní harmonické. V literatuře se neuvádí žádné limity, co by musely být splněny. [23]

1.4. Kolísání napětí

Kolísání napětí definujeme po sobě jdoucími změnami efektivní nebo maximální hodnoty napětí nebo jako cyklické změny obálky křivky napětí. Tolerance kolísání napětí se pohybuje v $\pm 10\%$ nominální hodnotě napětí. Hlavní příčinou vyvolávající změnu napětí je změna činného a jalového výkonu na proměnlivé zátěži. [1][3]

Těmito zdroji kolísání napětí mohou být:

- Obloukové pece
- Svářecí agregáty (odporové a obloukové)
- Řízené měniče pro napájení technologických pohonů
- Spouštění asynchronních motorů
- Spotřebiče s pulzujícím odběrem
- Spínání a vypínání velkých zátěží

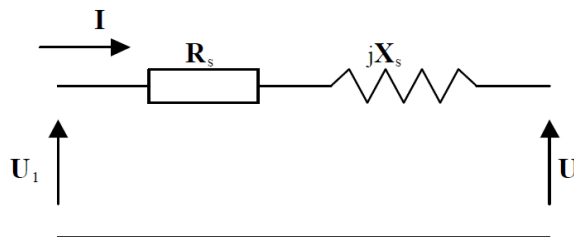


Obrázek 18 Kolísání napětí se znázorněnými základními pojmy [1]

1.5. Flikr

V procesu výroby, přenosu a distribuce elektrické energie může docházet vlivem rušení ke kolísání napětí. Se změnou amplitudy napájecího napětí dochází ke změně světelného toku světelných zdrojů. S tímto je spojen jev nazýván jako flikr, který vyvolává vizuální dojem blikání při nestabilním světelném toku, u kterého se s časem mění jeho jas nebo spektrální rozdělení. Lidské oko je nejvíce citlivé na kolísání napětí s frekvencí 8-12 Hz. Flikr negativně ovlivňuje zrakovou činnost člověka, vytváří nepohodu a zhoršuje kvalitu práce. [14]

Rozbor původu flikru:



Obrázek 19 Schéma náhradního obvodu napájecí sítě [1]

Průchodem proudu obvodem přes odpor a reaktanci vedení vznikají úbytky napětí, z toho důvodu napětí na začátku bude větší než napětí na konci. Úbytek napětí lze vyjádřit vztahem: [1]

$$U = U_1 - \Delta U = U_1 - (I_\xi \cdot R_s + I_j \cdot X_s)$$

Jednotlivé složky proudu: [1]

$$I_\xi = I \cdot \cos \varphi = \frac{P}{3 \cdot U}$$

$$I_j = I \cdot \sin \varphi = \frac{Q}{3 \cdot U}$$

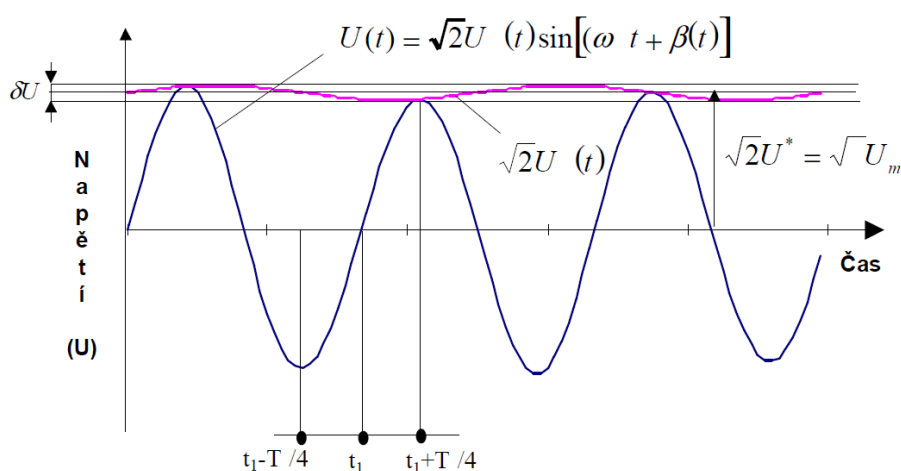
Dosazením do přechodného vztahu dostaneme: [1]

$$U = U_1 - \frac{1}{3 \cdot U} (P \cdot R_S + Q \cdot X_S)$$

Ze vztahu vyplývá, že změny napětí závisí na změnách činného P a jalového Q výkonu. [1]

$$\delta U = \frac{1}{3 \cdot U} (\delta P \cdot R_S + \delta Q \cdot X_S) = \Delta I_c \cdot R_S + \Delta I_j \cdot X_S = \delta(\Delta U)$$

Pokud zatěžíme konstantním zatížením pak, $\delta P = 0$ a $\delta Q = 0$ a pak i $\delta U = 0$ a napětí se s časem nemění. [1]



Obrázek 20 Časový průběh kolísání napětí [1]

Efektivní hodnota napětí v čase t_1 vyjádřena vztahem: [1]

$$U(t) = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_1 - \frac{T}{4}}^{t_1 + \frac{T}{4}} u^2(t) \cdot dt}$$

kde $T = 20 \text{ ms}$ a $\omega = 2\pi/T$

$$U_{(stř)} = \lim \left[\frac{1}{T} \int_0^T U(t) \cdot dt \right] = U$$

Z toho vyplývá, že změnu napětí vyvolává i frekvence.

1.5.1. Míra vjemu flikru

Flikrem se rozumí náhodná veličina, která se vlivem změn zatížení mění v širokém intervalu a nepravidelně. Míra vjemu flikru je důležitým ukazatelem kvality napětí. Díky tomu můžeme zjistit odkud se flikr šíří a kdo za něj nese odpovědnost. Proto jsou pro vyhodnocování kvality napětí zavedeny parametry krátkodobá míra vjemu flikru P_{st} a dlouhodobá míra vjemu flikru P_{lt} . Určují míru kolísání

napětí k osvětlení a jejich dopad na člověka. Hodnoty kolísání napětí získáváme měřením, výpočtem nebo simulací. Pro vyhodnocení a zpracování naměřených dat potřebujeme minimální dobu měření 7 dní. [1][15]

1.5.2. Krátkodobá míra vjemu flikru P_{st}

Krátkodobá míra vjemu flikru P_{st} se zjišťuje měřením v intervalu 10 minut a je vhodná pro ověřování jednoho zdroje rušení. [1]

Pro určení krátkodobé míry vjemu flikru je normou definován algoritmus

$$P_{st} = \sqrt{(K_1 \cdot P_1 + K_2 \cdot P_2 + \dots + K_n \cdot P_n)}$$

kde K_1 až K_n jsou váhové koeficienty

P_1 až P_n jsou úrovně překročení v distribuční funkci (percentily).

Dle IEC je algoritmus definován 5 úrovněmi [1]

$P_{0,1}$ je úroveň, která je překročena jen v 0,1 % času pozorované periody

P_1 je úroveň, která je překročena jen v 1 % času pozorované periody

P_3 je úroveň, která je překročena jen v 3 % času pozorované periody

P_{10} je úroveň, která je překročena jen v 10 % času pozorované periody

P_{50} je úroveň, která je překročena jen v 50 % času pozorované periody

Váhové koeficienty jsou: [1]

$K_{0,1}$ pro úroveň 0,1 % = 0,0314

K_1 pro úroveň 1 % = 0,0525

K_3 pro úroveň 3 % = 0,0657

K_{10} pro úroveň 10 % = 0,28

K_{50} pro úroveň 50 % = 0,08

Zátěže se stabilním cyklem zapnuto/vypnuto generují konstantní rušení během jejich chodu. Avšak docházelo zde k nestabilitě, která byla zapříčiněna malou změnou v délce cyklu a tím i chybou při výpočtu hodnot flikru. Proto se zavedl pro výpočet tzv. vyhlazené hodnoty percentil. [1]

$$P_{50s} = \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3}$$

$$P_{10s} = \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5}$$

$$P_{3s} = \frac{P_{2,2} + P_3 + P_4}{3}$$

$$P_{1s} = \frac{P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}}{3}$$

Flikmetr má v sobě zabudovanou časovou konstantu 0,3 sekund a tím se hodnota $P_{0,1}$ nemusí vyhlazovat, protože se nemůže náhle měnit. [1]

1.5.3. Dlouhodobá míra vjemu flikru P_{lt}

Dlouhodobá míra vjemu flikru P_{lt} se používá pro ověření rušení většího počtu zdrojů např. skupina zátěží s delším a proměnlivým pracovním cyklem. Měření se provádí v intervalu 120 minut za využití 12 hodnot P_{sti} . [1]

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

Dle normy ČSN EN 50160 nesmí 95 % hodnot P_{lt} během jakéhokoliv měřeného týdenní periody překročit hodnotu 1,0. [1]

1.5.4. Možnost omezení kolísání napětí

Účinek kolísání napětí je převážně závislý na jeho amplitudě, typu zátěže a charakteru provozu. Častou možností omezení dochází právě k omezení amplitudy kolísání napětí. Použití u těchto případů: [1] [14]

- Oblouková pec – zapojením sériového rektoru, změna regulace elektrod, přechod na stejnosměrné elektrické obloukové pece
- Svařovna – napájení je zajištěno pouze z určeného transformátoru, zajištěním symetrizace zátěže mezi fázemi (jednofázové svařečky připojeny na různé fáze napájecí sítě), změna tvaru napěťového pulsu
- Motory s regulací otáček – využití softstartu

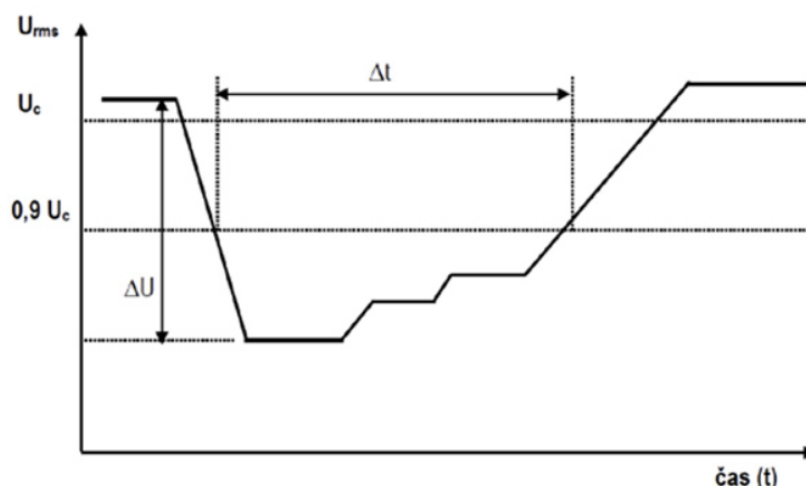
K omezení kolísání napětí využíváme taktéž možnosti zvýšení zkratového výkonu v bodě připojení kolísavé zátěže. A to docílíme:

- Zvětšením průřezu napájecího vedení
- Připojením synchronního generátoru nebo kompenzátoru
- Využitím sériové kompenzace
- Připojením zátěže do vyšší napěťové hladiny
- Zvýšení jmenovitého výkonu transformátorů napájejících kolísavou zátěž
- Oddělení napájení kolísavé zátěže a stabilní zátěže z oddělených vinutí trojfázového transformátoru

1.6. Poklesy a přerušení napětí

1.6.1. Pokles napětí

K poklesům napětí dochází v důsledku změny jalového a činného proudu odebíraného zátěží připojených k síti. To vyvolá změnu úbytku napětí na impedanci sítě, a tedy zmíněný pokles napětí. Poklesem napětí rozumíme nežádoucí náhodný stav, při kterém se nedodává požadovaná hodnota energie do zátěže. V normálních provozních podmínkách sítě se těmto poklesům napětí nevyhneme. Množství poklesů za jeden rok se nedá předpovídat, ale uvádí se od několika desítek až do jednoho tisíce. Hloubka těchto poklesů bývá menší než 60 %, ale mohou se vyskytovat i daleko hlubší poklesy mezi 10 % až 15 %, které jsou způsobeny spínáním zatížení u odběratelů. Doba trvání bývá menší než 1 sekunda. [1][12]



Obrázek 21 Časový průběh poklesu napětí [13]

Tabulka 2 Počet poruch za rok s hloubkou poklesu a dobou trvání [1]

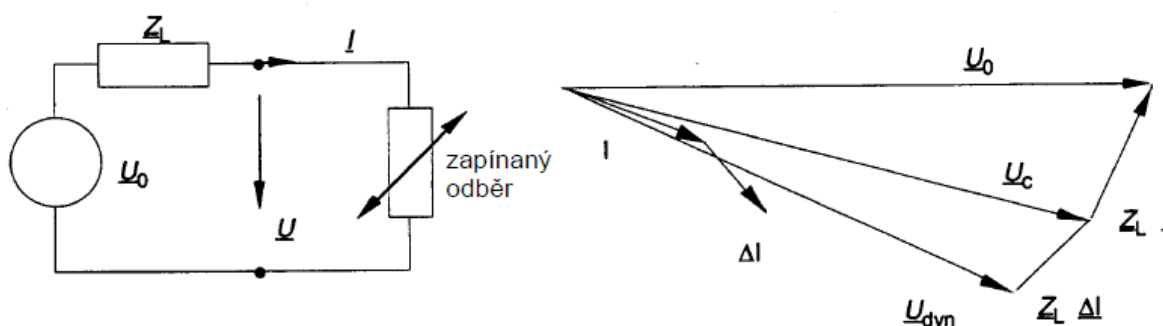
Hloubka poklesu	Doba trvání			
	10 ms až 100 ms	100 ms až 500 ms	500 ms až 1 s	1 s až 3 s
10 až 30 %	61	66	12	6
30 až 60 %	8	36	4	1
60 až 100 %	2	17	3	2
100 %	0	12	24	5
Počet poruch za rok				

Krátkodobý pokles napájecího napětí je charakterizován náhlým poklesem napájecího napětí na hodnotu mezi 90 % a 1 % dohodnutého napětí. Po poklesu musí dojít k obnovení napětí během krátkého časového intervalu. Hodnota pro obnovení napětí se pohybuje mezi 10ms a 1 minutou. Míra poklesu je definována hloubkou krátkodobého poklesu napětí, a ta je dána rozdílem efektivních hodnot sníženého napětí vůči dohodnutému napětí. Změna napětí, která nedosáhne hloubky pod 90 % dohodnutého napětí se nepovažuje za pokles. Dlouhodobé poklesy napájecího napětí často zapříčiníme úmyslně dodavatelem z důvodu omezení zatížení v čase maximálního odběru nebo vlivem měkké sítě v závislost na jejím zatížení. Poklesy napětí jsou způsobeny ze dvou hlavních důvodů.

Jedním z těchto důvodů je vliv připojení velké zátěže na síť a ten druhý je způsoben poruchami v síti. [1][12]

1.6.2. Poklesy vlivem velké zátěže

Připojením velké zátěže na síť např. velký pohon dochází k jeho rozběhu, a tím k vzniku rozběhového proudu, který dosahuje v nejhorších případech až 7násobek normálního provozního proudu. Napájecí síť a instalační kabely jsou dimenzovány na provozní proud, ale přítomností rozběhového proudu dochází k poklesu napětí v napájecí síti a také ve vnitřní instalaci. Velikost poklesu závisí na impedanci společného napájecího bodu a na impedanci kabelů tzv. tvrdosti sítě. Poklesy napětí způsobené vlivem rozběhu zátěže se charakterizují malou hloubkou poklesu, ale delším trváním. [12]



Obrázek 22 Model obvodu a vektorový diagram se změnami napětí vlivem připojení k síti [1]

Pokud v instalaci máme kabeláž s vysokými hodnotami odporů, tyto hodnoty způsobují velké úbytky napětí, a zároveň i pokles napětí. Řešením tohoto problému je připojení velké zátěže přímo ke zdroji na společný napájecí bod nebo na sekundární stranu napájecího transformátoru. Druhý problém nastává s impedancí napájecí sítě tzn. příliš měkká napájecí síť. Jedna z možností je použití softstarteru, který omezuje rozběhový proud, ale doba rozběhu je delší v řádu sekund. Další možností je snížit impedanci napájecí sítě po konzultaci s distributorem společnosti. V případě, že se nepodaří snížit napětí, pak se přistupuje k variantám pro jeho kompenzaci. [12]

1.6.3. Poklesy způsobené poruchami v síti

Topologie napájecí sítě je v mnoha případech složitá. Porucha v elektrické síti způsobí jednak pokles napětí v daném místě a také dojde k poklesu napětí v celé elektrické síti. Míra poklesu v určitých místech sítě je dána její topologií, vzájemnou impedancí poruchy, zátěže a generátorů v jejich společném napájecím bodě.

1.6.4. Přerušení napětí

Přerušení napájecího napětí nastává, když hodnota dohodnutého napětí v předávacím místě je menší než 1 %. Přerušení napětí rozdělujeme na:

- Předem dohodnuté – kdy distributor předem oznámí spotřebitelům přerušení napájecího napětí na určitou dobu z důvodů plánovaných prací na distribuční síti.

- Poruchové – nepředvídatelné jevy převážně spojeny s vnějšími vlivy, poruchami na zařízení nebo rušením, které nastávají trvalými nebo přechodnými poruchami.

Dále poruchové přerušení dělíme na:

- Dlouhodobé přerušení – doba přerušení delší než 3 minuty, vlivem trvalé poruchy.
- Krátkodobé přerušení – doba přerušení do 3 minut, vlivem přechodné poruchy.

1.6.5. Poruchy v rozvodné síti

Hlavní příčinou přerušení napětí a výpadku dodávky elektrické energie jsou poruchy. V hojném počtu případů místem postiženého poruchou prochází zkratový proud, který musí vypínač v co nejrychlejším čase být schopen vypnout.

Příčiny poruch

- Externí (atmosférické a nepředvídatelné příčiny nezávislé na stavu sítě)
- Interní (poruchy spojeny s ukončením životnosti zařízení sítě)

1.6.5.1.1. Externí příčiny

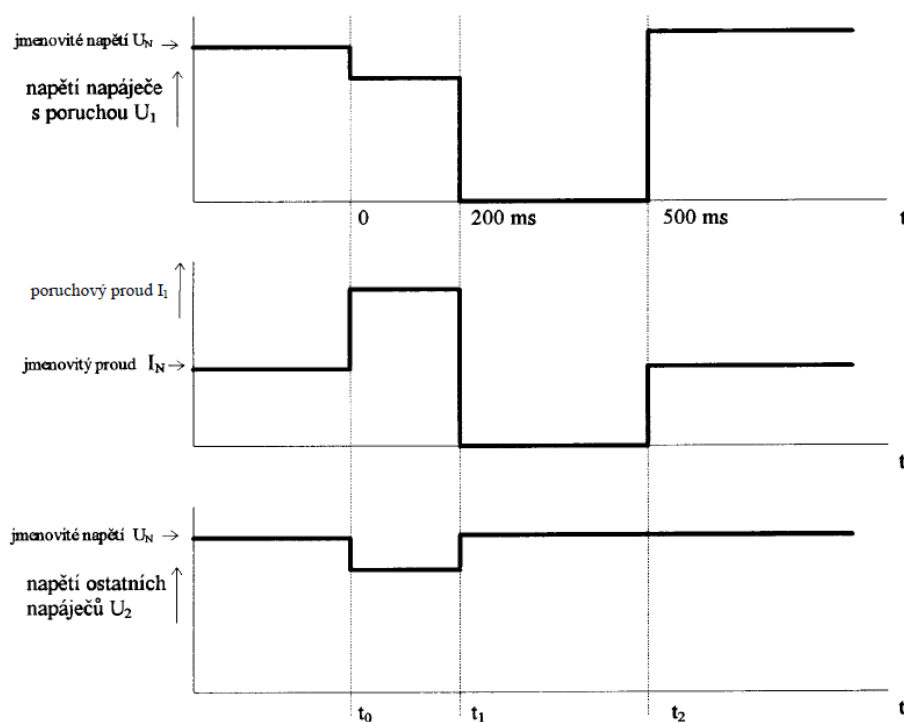
Nejčastějšími příčinami ovlivňující venkovní vedení je počasí (bouřka, blesk, mlha, sníh, mráz atd.). Jako další jsou náhodné příčiny, mezi které zahrnujeme dotyk s cizími částmi (větve stromů, ptáci atd.), poškození sloupu vedení vozidlem, překopnutí kabelu při výkopových pracích. Anebo může dojít k přenosu poruchy z průmyslové sítě.

1.6.5.1.2. Interní příčiny

Zde může být příčinou průraz izolace zařízení sítě (izolátory vedení, kabely, transformátory, vypínače atd.), chybné funkce ochrany nebo chybná manipulace obsluhy sítě.

1.6.5.2. Krátkodobé přerušení napájecího napětí

Krátkodobé přerušení napájecího napětí využívá automatické opětné zapínání, které se tímto způsobem jednak snaží eliminovat poruchy, ale rovněž chrání venkovní vedení proti škodám vznikajících přeskoky na izolátorech. V případě poruchy např. pád větví stromu na vedení, dojde nejprve k poklesu napětí v místě poruchy a následuje vypnutí vypínačem v časovém intervalu do stovek milisekund. Po vypnutí vypínačem se automatika opětného zapnutí pokusí o znovu zapnutí postiženého vedení poruchou. Celý cyklus od vzniku poruchy po opětovné zapnutí trvá do 1 sekundy. V případě úspěšného znovu zapnutí došlo k obnově napájení, a tím k eliminaci poruchy. Zátěže postižené poruchou jsou před znovu zapnutím vystaveny 100% poklesu napětí. To stejné nemůžeme říct o ostatních zátěžích v elektrické síti, u kterých dojde pouze k menším a kratším poklesům napětí mezi vznikem poruchy a vypnutím. Jestliže porucha trvá i po znovu zapnutí, záleží na typu automatického opětného zapínání, jestli bude provádět opětné zapnutí znovu nebo trvale odpojí postiženou část sítě. Automatika opětného zapnutí usnadňuje řešení těchto poruch, ale zároveň to vede ke zvýšení počtu poklesů napětí. [1][12]



Obrázek 23 Průběh napětí a proudu při funkci OZ [1]

1.6.5.3. Dlouhodobé přerušení napájecího napětí

Dlouhodobé přerušení napájecího napětí je způsobeno buď to, neočekávanou poruchou nebo vnějšími vlivy. Dlouhodobé přerušení se považuje za čas delší jak 3 minuty. Takovým příkladem může být opět pád větví na vedení. Zde se jedná ale o časově náročnější a komplikovanější případ, kdy nelze automatikou eliminovat poruchu. Dochází k rozpojení obvodu. Odběratelé v tomhle případě, pokud není možnost napájení z jiného vedení, budou bez napětí, dokud nedojde k odstranění poruchy a obnově elektrické energie. [1][12]

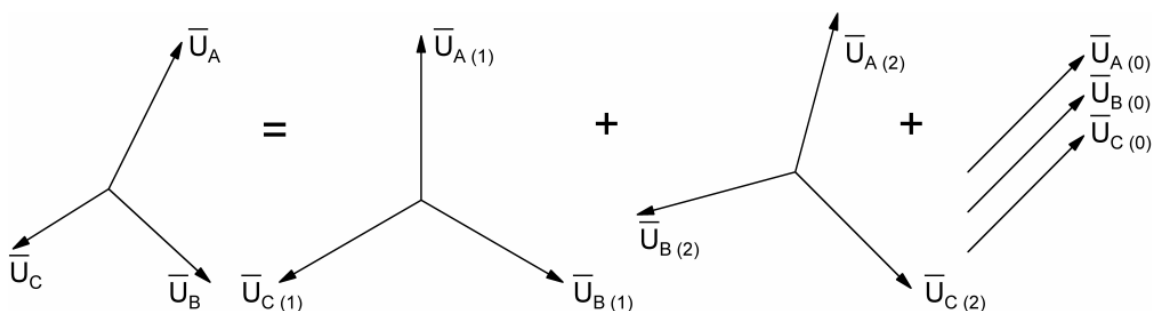
1.6.6. Účinky poklesu napětí a krátkých přerušení napětí

Poklesy a krátká přerušení napětí negativně působí na připojená zařízení do rozvodné sítě. Tímto vznikají nežádoucí jevy, které mohou být:

- Zhášení výbojek
- Narušení funkce regulačních přístrojů
- Změny rychlosti nebo zastavování motorů
- Vypínání stykačů
- Výpočetní chyby počítačů a ztráta dat v paměti
- Chybná funkce měřících přístrojů vybavených elektronikou
- Ztráta synchronního chodu synchronních motorů a generátorů
- Komutační chyby tyristorových můstků pracujících ve střídačovém režimu

1.7. Nesymetrie napětí

Trojfázové soustavy nazýváme souměrnými nebo symetrickými, jestliže trojfázová napětí a proudy mají stejnou amplitudu a jsou vůči sobě fázově posunuty o 120° . V případě, že jedna z těchto podmínek není splněna, pak soustavu nazýváme nesouměrnou nebo nesymetrickou. Připojením nesymetrické zátěže do trojfázové soustavy dojde k odběru nesymetrického proudu, a tím i k nesymetrii napájecího napětí. Rovněž nesymetrie zvyšuje přenosové ztráty a nevyváženost vytížení trojfázového vedení. K vyšetřování a vyhodnocení nesymetrie napětí, respektive proudu, používáme metodu souměrných složek. Metoda využívá skutečnosti, že každou nesymetrickou trojfázovou soustavu fázorů můžeme rozložit na tři souměrné soustavy. [1]



Obrázek 24 Rozložení nesymetrické soustavy na tři souměrné soustavy [16]

1.7.1. Trojfázová soustava harmonických veličin

Každá trojfázová soustava harmonických veličin (napětí nebo proud) $\bar{f}_A(t)$, $\bar{f}_B(t)$, $\bar{f}_C(t)$, kterou považujeme za souměrnou je charakterizována svými fázory \bar{F}_A , \bar{F}_B , \bar{F}_C a splňuje následující podmínky: [1]

- Stejná efektivní hodnota $\bar{F}_A = \bar{F}_B = \bar{F}_C$
- Vzájemný fázový posun vůči fázím $\frac{2\pi}{3}$

Za vyváženou trojfázovou soustavu harmonických veličin považujeme, platí-li:

$$\bar{f}_A(t) + \bar{f}_B(t) + \bar{f}_C(t) = 0$$

a pro fázory

$$\bar{F}_A + \bar{F}_B + \bar{F}_C = 0$$

Metodu souměrných složek aplikujeme na nesouměrnou trojfázovou soustavu harmonických veličin (napětí a proud), kdy rozkladem nesouměrné soustavy fázorů vzniknou tři souměrné soustavy. Každá soustava se řeší samostatně a celkovým výsledkem bude jejich součet. Aplikace metody souměrných složek v lineárních obvodech. [1]

Dále budeme pro aplikaci metody souměrných složek uvažovat pouze napětí. Stejný postup je i pro proud.

Rozkladem dostáváme tři souměrné soustavy: [1]

- Soustavu souměrnou, značení indexem 1

$$\bar{U}_{A(1)} = \bar{U}_1 \quad \bar{U}_{B(1)} = a^2 \bar{U}_{(1)} \quad \bar{U}_{C(1)} = a \bar{U}_{(1)}$$

- Soustavu zpětnou, značení indexem 2

$$\bar{U}_{A(2)} = \bar{U}_{(2)} \quad \bar{U}_{B(2)} = a \bar{U}_{(2)} \quad \bar{U}_{C(2)} = a^2 \bar{U}_{(2)}$$

- Soustavu nulovou (netočivá), značení indexem 0

$$\bar{U}_{A(0)} = \bar{U}_{B(0)} = \bar{U}_{C(0)} = \bar{U}_{(0)}$$

Operátor $\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -0,5 + j\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$

$$\bar{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -0,5 - j\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

Součtem jednotlivých složek dostaneme původní fázory napětí. [16]

$$\bar{U}_A = \bar{U}_{A(0)} + \bar{U}_{A(1)} + \bar{U}_{A(2)}$$

$$\bar{U}_B = \bar{U}_{B(0)} + \bar{U}_{B(1)} + \bar{U}_{B(2)}$$

$$\bar{U}_C = \bar{U}_{C(0)} + \bar{U}_{C(1)} + \bar{U}_{C(2)}$$

Dosazením do předchozích rovnic získáme tvar: [16]

$$\bar{U}_A = \bar{U}_{(0)} + \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)}$$

$$\bar{U}_B = \bar{U}_{(0)} + a^2 \bar{U}_{(1)} + a \bar{U}_{(2)}$$

$$\bar{U}_C = \bar{U}_{(0)} + a \bar{U}_{(1)} + a^2 \bar{U}_{(2)}$$

Rovnice vyjádříme v maticovém tvaru $\bar{U}_f = \bar{F} \cdot \bar{U}_s$ [16]

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(3)} \end{pmatrix}$$

Matice \bar{F} je tzv. Fortescue matice. Tím, že determinant matice \bar{F} není nulový, můžeme provést inverzi matice \bar{F} , tím získáme nový maticový přepis ve tvaru $\bar{U}_s = \bar{F}^{-1} \cdot \bar{U}_f$ pro jednotlivé složky napětí. [16]

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(3)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Přepisem matice do tvaru rovnice dostáváme jednotlivé složky napětí. Sečtením tří fázorů můžeme tedy vyhodnocovat jakékoliv odchylky od třífázové sítě. [1]

$$\bar{U}_{(0)} = \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C)$$

$$\bar{U}_{(1)} = \frac{1}{3}(\bar{U}_A + a\bar{U}_B + a^2\bar{U}_C)$$

$$\bar{U}_{(2)} = \frac{1}{3}(\bar{U}_A + a^2\bar{U}_B + a\bar{U}_C)$$

Trojfázovou soustavu považujeme za vyváženou, pokud je nulová složka rovna nule. [1]

Trojfázová nesouměrná soustava společně s jejich třemi souměrnými složkami jsou zobrazeny fázory v Gaussově rovině. Fázorům odpovídají vektory s příslušným otáčením v matematicky kladném smyslu úhlovou rychlostí kolem počátku. [1]

Sousledná složka má stejný sled fázi jako zkoumaná nesouměrná soustava, u zpětné složky to je přesně naopak. Nulové složky mají stejný fázový posun. V zapojení bez středního vodiče se nulová složka neobjeví. [1]

Kvalitu elektrické energie můžeme posuzovat pomocí činitele nesouměrnosti (dle normy nesymetrie), který je definován jako poměr efektivní hodnoty (amplitudy) zpětné složky ke složce sousledné. [1]

$$\rho_U = \frac{\bar{U}_{(2)}}{\bar{U}_{(1)}} \cdot 100$$

Anebo pomocí činitele nevyváženosti, který je definován jako poměr efektivní hodnoty (amplitudy) nulové složky k složce sousledné. [1]

$$\eta_U = \frac{\bar{U}_{(0)}}{\bar{U}_{(1)}} \cdot 100$$

Aby byla zajištěna spolehlivost a správná funkce zařízení, jsou normou určeny mezní hodnoty, které nesmí být překročeny. Činitel nesymetrie pro a vn systémy <2 %, pro vnn systémy <1 %. [18]

1.7.2. Zdroje napěťové nesymetrie

Nejtypičtějším zdrojem nesymetrického zatížení v síti nn jsou jednofázové zátěže. V sítích vn a vvn jsou nesymetrie způsobeny převážně: [3]

- Indukční pece pracující se síťovým kmitočtem
- Odporové tavící pece
- Odporové svářečky
- Obloukové pece
- Obloukové ocelářské tavící pece

1.7.3. Důsledky působení nesymetrie

Nesymetrie napětí působí na každé zařízení jinak. Nejčastěji se setkáváme s problémy u zařízení: [18]

- stroje a generátory – zde dochází k nadměrnému oteplování, snižování točivého momentu vlivem zpětných složek a zvýšení vibrací vedoucí k poškození ložisek
- zatížitelnost transformátorů, kabelů a vedení – při návrhu musíme počítat se zpětnými složkami, protože snižují maximální zatížitelnost a jsou vyjádřeny činitelem snížení zatížení uvedený výrobcem
- transformátory – nadměrné oteplování, zpětné složky zvyšují ztráty a tím také snižují zatížitelnost

1.7.4. Možnosti snížení napěťové nesymetrie

Omezení účinků nesymetrie můžeme provést několika způsoby. [3]

- Přerozdělení jednofázových zátěží mezi fázové vodiče
- Symetrizační zařízení s kondenzátory a tlumivkami
- Připojení k místům s vyšším zkratovým výkonem
- Použitím Scottova nebo Steinmentzova transformátoru

Ve většině případů nesymetrie vzniká nesouměrným zatížením. V sítích nn se jednofázové zátěže připojují na fázi a nulový vodič. Abychom omezili nesymetrii napětí, provádí se přerozdělení zátěží na jednotlivé fáze v rovnoměrném rozdělení. Ve většině případů činitel nesymetrie nepřekročí 1 % a zátěž vyhovuje. [3]

Nesymetrie napětí negativně ovlivňuje síť, a proto je snaha mít v soustavě co nejnižší vnitřní impedanci. Je to dáno tím, že s malou vnitřní impedancí dosahujeme velkých zkratových výkonů. Například připojovací bod pro připojení fotovoltaického článku na síť nízkého napětí má velkou hodnotu impedance, tím má malý zkratový výkon a vede to k nesymetrii napětí. Proto se přistupuje k tomu, že nesymetrické zátěže připojujeme na vyšší napěťové hladiny. Tato tvrzení vychází ze vzorce pro činitel nesymetrie a jeho úpravou dostáváme: [18]

$$\rho_U = \frac{S_L}{S_K} \cdot 100$$

Zdánlivý výkon zátěže S_L

Zkratový výkon napájecího obvodu S_K

1.8. Přepětí

Přepětí definujeme jako napětí mezi fázemi nebo mezi fázemi a zemí, které svou velikostí amplitudy překračují dovolenou hodnotu nejvyšší napětí sítě. Každé napěťové hladině odpovídá jmenovitá hodnota U_N a nejvyšší napětí sítě U_M . V místě vzniku přepětí dochází ke snižování životnosti zařízení a izolace. Proto musí být zařízení navržena tak, aby odolala určité velikosti přepětí po určitou dobu. Ke vzniku přepětí dochází vlivem spínacích činností, poruch nebo atmosférických událostí. [20][21]

Tabulka 3 Jmenovité hodnoty napětí s nejvyšším napětím sítě [21]

U_N (kV)	6	10	22	35	110	220	400
U_M (kV)	7,2	12	25	38,5	123	245	420

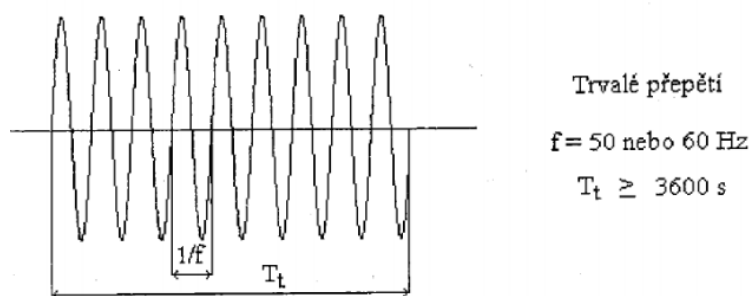
Velikost přepětí určujeme činitelem k . Pokud je číselník k vyšší než 1, tak se bavíme o přepětí.

$$k = \frac{\text{maximální hodnota napětí vodič – zem}}{\text{maximální hodnota nejvyššího napětí vodič – zem}}$$

1.8.1. Druhy přepětí

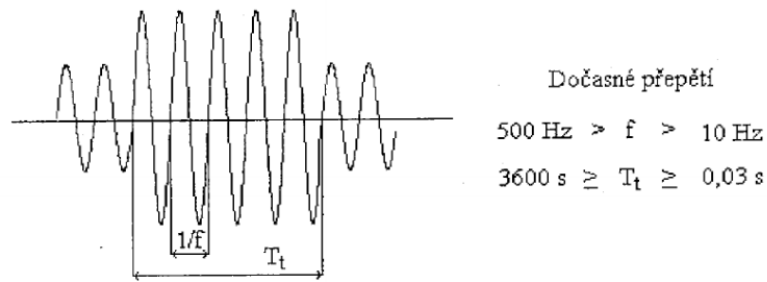
Přepětí se v trojfázových střídavých sítích můžou odlišovat podle jejich velikosti, časových průběhů, důsledkem vzniku nebo frekvencí výskytu. [20]

- Trvalé přepětí – vzniká v důsledku nesprávného nastaveného přepínače odboček na transformátoru



Obrázek 27 Průběh trvalého přepětí [20]

- Dočasné přepětí – například vlivem zemního spojení

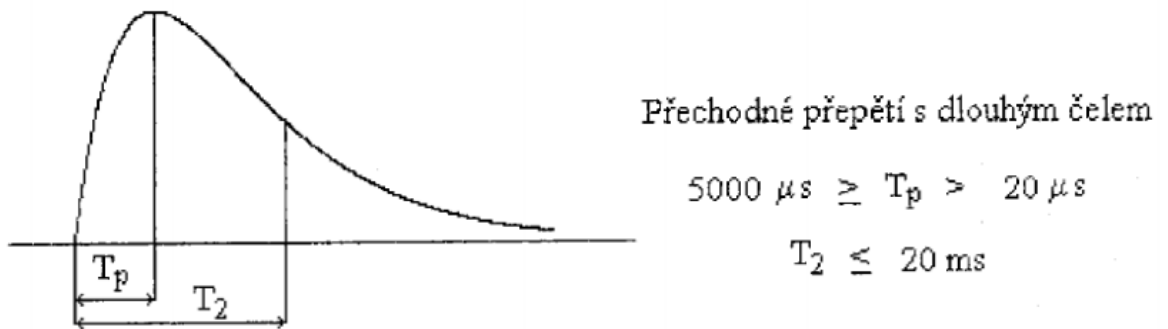


Obrázek 28 Průběh dočasného přepětí [20]

- Přechodné přepětí – přepětí, které na rozdíl od předchozích případů odezní samovolně, za příklad můžeme považovat spínání kondenzátorových baterií

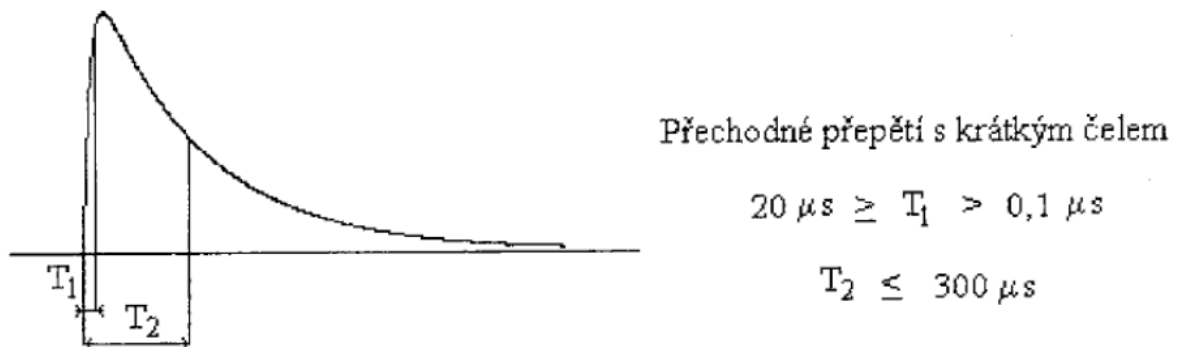
Přechodné přepětí rozlišujeme podle délky čela: [20]

- Přepětí s dlouhým (pomalým) čelem – většinou impulzní přechodné přepětí, doba vrcholu $20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ a doba trvání půltýlu $T_2 \leq 20 \text{ ms}$



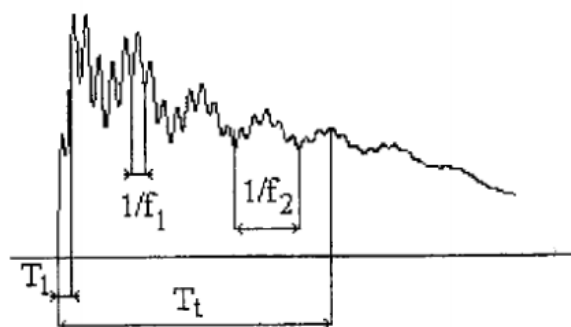
Obrázek 29 Průběh přechodného přepětí s dlouhým čelem [20]

- Přepětí s krátkým (rychlým) čelem – většinou impulzní přechodné přepětí, doba vrcholu $0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ a doba trvání půltýlu $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$



Obrázek 30 Průběh přepětí s krátkým čelem [20]

- Přepětí s velmi krátkým (velmi rychlým) čelem – většinou impulzní přechodné přepětí, doba vrcholu $T_1 \leq 0,1 \mu\text{s}$ a doba trvání půltýlu $T_t \leq 3 \text{ ms}$, superponované napětím s frekvencí od 30 kHz do 100 MHz



Přechodné přepětí s velmi krátkým čelem

$$100 \text{ ns} \geq T_1 \geq 3 \text{ ns}$$

$$T_t \leq 3 \text{ ms}$$

$$0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$$

$$30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$$

Obrázek 31 Průběh přepětí s velmi krátkým čelem [20]

1.8.1.1. Atmosférické přepětí

Typickým příkladem vzniku atmosférického přepětí je úder blesku do vedení nebo následnou elektromagnetickou indukcí do vedení při úderu blesku v jeho blízkosti. Krátkodobé přepětí, je takové přepětí, kde se doba trvání blesku pohybuje v mikrosekundách. Proto hovoříme o přepětí s krátkým (rychlým) čelem a velmi krátkým (velmi rychlým) čelem. [20]

1.8.1.2. Spínací přepětí

Spínací přepětí vznikají v důsledku náhlých změn parametrů soustavy vyvolávající přechodné jevy. K tomu dochází vypínáním a zapínáním vedení, transformátorů a dalších zařízení v síti nebo při zkratech a zemních spojení. Zde hovoříme o přepětí s dlouhým (pomalým) čelem. [20]

1.8.1.3. Přepětí při zemním spojení

V sítích s izolovaným nulovým bodem nebo s nepřímo uzemněným nulovým bodem přes tlumivku je zemního spojení doprovázeno následným přepětím: nejvyšší možné přepětí se uvádí 3,5x fázového napětí. [10]

1.8.1.4. Přepětí při vypínání zkratů

Během provozu sítě se setkáváme s řadou poruch, které nelze předpokládat. Proto musíme vždy počítat s těmi nejhoršími případy, které mohou v elektrické síti vzniknout. Při vypínání zkratů dochází k přechodovým dějům, které vedou k přepětím. Při vypínání zkratu se mezi kontakty objeví oblouk, který nadále udržuje proudovou cestu až do definitivního vypnutí. Po vypnutí vypínačem se mezi kontakty objeví napětí, které nazýváme zotavené napětí a jeho přechodová složka nám charakterizuje přepětí. [20]

1.8.1.5. Přepětí při vypínání malých induktivních proudů

Vznik přepětí nastává v síti při vypínání transformátorů naprázdno, motorů naprázdno, reaktorů nebo kompenzačních tlumivek. Vypínání induktivních proudů je složitější pro obvody s menším účinníkem. Předpokládá se, že používáme vypínače s účinným zhášedlem, a proto dochází k přerušení proudu před jeho přirozenou nulou. Tím vznikají přepětí, dosahující mnohonásobku jmenovitého napětí. [22]

1.8.1.6. Přepětí při spínání kapacitních proudů

Na rozdíl od vypínání malých induktivních proudů k přepětí dochází při zapínání i vypínání kapacitních proudů. Typickými případy spínání kapacitních proudů jsou kondenzátorové baterie, rozsáhlé kabelové sítě naprázdno nebo dlouhá vedení naprázdno. [20]

1.8.2. Způsob eliminace přepětí

V elektrické síti se objevují různé nepředvídatelné jevy, která ovlivňují nejen kvalitu elektrické energie, ale také správnou funkci zařízení a jejich dobu životnosti. S tímto faktem se proti přepětí instalují přepětové ochrany. Přepětová ochrana musí mít za normálních provozních podmínek tak velkou impedanci, aby přes ni neprotékal proud. V případě zvýšení hodnoty napětí nad nastavenou hladinu, ochrana musí snížit její impedanci, a tím svede přepětí do země. Po odeznění přepětí se impedance musí vrátit zpět na svou původní hodnotu. [20]

Přepětové ochrany můžeme dělit:

- Ochrana vedení před atmosférickým přepětím
- Svodič přepětí

1.8.2.1. Ochrana vedení před atmosférickým přepětím

Tento typ přepětí považujeme za nejnebezpečnější. K jeho omezení využíváme zemních lan, které se instalují souběžně s fázovými vodiči. Zemí lana jsou uzemněna a umístěna vhodně tak, aby byla větší šance jejich zásahu při úderu blesku místo fázových vodičů. Nejčastějším konstrukčním umístěním je vrchol stožáru. [20]

1.8.2.2. Svodič přepětí

Svodiče přepětí se zapojují paralelně k chráněnému objektu. Rozdělujeme je podle jejich konstrukce, kdy každý z nich má jiné vlastnosti, ale v principu fungují stejně, se změnou velikosti impedance dochází ke změně velikosti napětí. Dělí se na: [20]

- Ochranné (koordinační) jiskřiště
- Vyfukovací bleskojistky
- Svodiče přepětí s nelineárními odpory
 - Ventilové bleskojistky
 - Svodiče přepětí se ZnO
- Svodiče přepětí pro ochranu vnitřních elektrických rozvodů a zařízení

2 Popis funkce WATTrouterů

WATTrouter jsou zařízení, která optimalizují vlastní spotřebu pro objekty, které využívají fotovoltaickou nebo větrnou elektrárnu. WATTrouter využívá vyrobenou elektrickou energii v době, kdy fotovoltaická nebo větrná elektrárna vyrábí a naopak, šetří energii, když elektrárny nevyrábí.

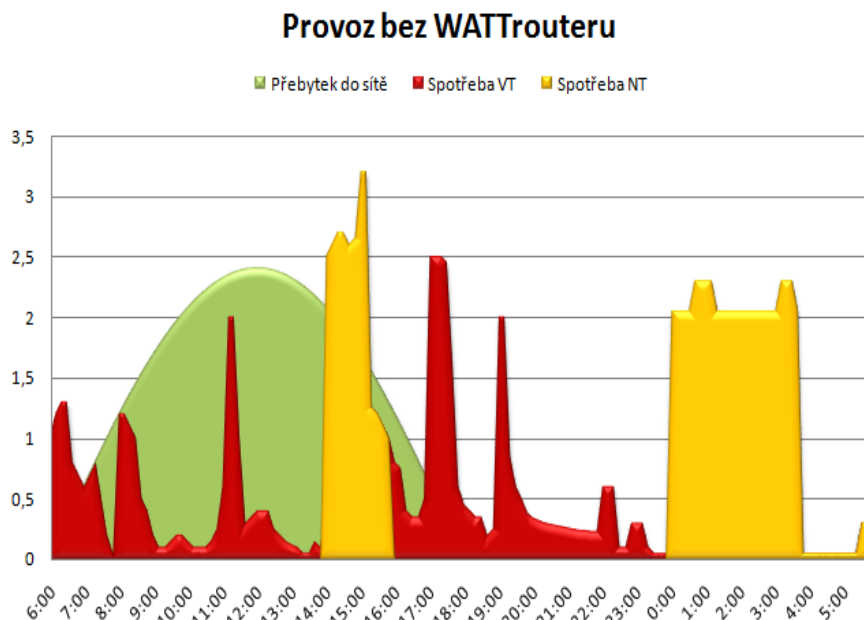
K tomu nám slouží připojování boilerů, akumulčních nádob, topných těles pro klimatizaci, bazénové filtrace, dobíjení elektromobilů apod. Jedná se tedy o spotřebiče, které dokážou účelně akumulovat elektrické přebytky v době, kdy elektrárna vyrábí.

Tento způsob ukládání energie je mnohem výhodnější než akumulace do baterií, protože většina spotřeby elektrické energie v domě tvoří ohřev teplé užitkové vody anebo energie potřebná k vytápění domů.

Výhoda spočívá nejenom z ekonomického hlediska, kdy výkupní cena přebytečné energie z elektráren je velmi nízká, ale také z ekologického hlediska, kdy se elektrická energie nemaří v distribuční síti, ale je přímo spotřebovávána v místě výroby. Další výhodou WATTrouterů je, že pomáhají stabilizovat distribuční síť a omezovat negativní vlivy elektráren, a to hlavně přepětí.

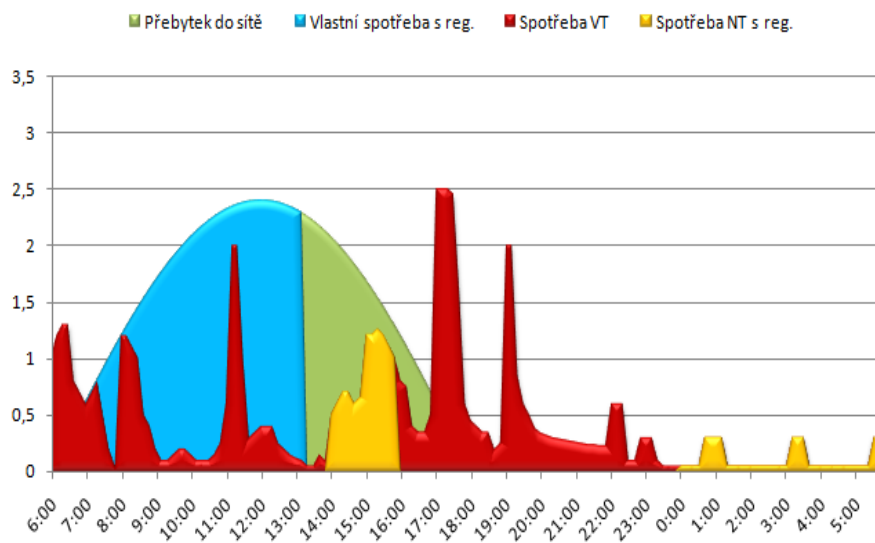
Využitelnost WATTrouterů si lze zobrazit na dvou grafech, kdy na prvním grafu máme provoz bez WATTrouterů a na druhém grafu máme s provozem WATTrouterů. Dále se uvažuje zapojení boileru na běžný osmihodinový nízký tarif, který se spíná od 14 do 16 a dále mezi půlnocí a 6 hodinou ranní.

Z následujících grafů vidíme, že v prvním případě, kdy je provoz bez WATTrouterů, se energie maří v síti, kdežto u provozu s WATTrouterem, se přebytečná energie akumuluje v boileru a tím vzniká úspora energie, která se následně projeví po celou dobu dne. [24]



Obrázek 32 Provoz sítě bez WATTrouteru [24]

Provoz s WATTrouterem



Obrázek 33 Provoz sítě s WATTrouterem [24]

WATTrouter měří v reálném čase proud ve všech fázích a regulátor vyhodnocuje měřené proudy a napětí. Jakmile začne elektrárna vyrábět elektrickou energii, dojde ke spínání spotřebičů, která mají přiřazenou prioritu. Regulátor se snaží nepřetržitě udržovat nulový tok energie měřícím modulem, a tím i elektroměrem.

Princip spínání spotřebičů závisí na výrobě elektrické energie elektrárnou. Ve výchozím stavu jsou všechny spotřebiče vypnuté. Při indikaci výroby sepne právě ten spotřebič, který má nastavenou nejvyšší prioritu. Při následné zvýšené výrobě se připojí další spotřebiče s nižší prioritou. Pokud dojde například k ohřátí boileru na dovolenou teplotu, dochází k vnitřnímu odpojení a regulátor připojí jiný spotřebič s nižší prioritou. Při snižování výroby dochází nejprve k odpojování spotřebičů s nižší prioritou a jako poslední se odpojují spotřebiče s nejvyšší prioritou. Standardním zapojením se rozumí zapojení měřícího modulu za elektroměr, kdy využívá pouze skutečné přebytky elektráren. Regulátor lze zapojit i tak, abychom regulovali celkovou výrobu elektrárny. [24]

3 Technické možnosti měření parametrů kvality

V další části diplomové práce se budeme zabývat přístroji, které se používají pro měření parametrů kvality sítě. Abychom mohli přístroje použít pro měření parametrů kvality, je potřeba aby splňovali třídu vykonávání měření dle normy ČSN EN 61000-4-30. Norma definuje tyto třídy přesnosti. [25]

- Třída A – pouze analyzátoři třídy A mohou být používány pro zjištění kvality mezi dodavateli a odběrateli. Norma dále říká, že pokud budeme vyhodnocovat jednotlivé parametry kvality sítě za použití různých výrobců s třídou A, které jsou připojeny na stejné signály, výsledky budou totožné, a to i pokud budeme měření opakovat.
- Třída B – přístroje s třídou B můžeme použít pro vyhodnocování parametrů kvality, ale výsledné naměřené hodnoty nelze považovat za zcela spolehlivé. Norma má řadu neurčitostí při vyhodnocování parametrů kvality pro tuhle třídu. Tímto je považujeme pouze za indikátory. Přístroje jsou tím pádem výrazně levnější, avšak na úkor přesnosti a věrohodnosti výsledků.
- Třída S – na přístroje s třídou S se kladou nižší nároky oproti třídě A. Nicméně všechny kladené požadavky dle normy jsou definovány a bez neurčitostí, jak tomu bylo u třídy B. [25]

Přístroje neboli analyzátoři dělíme na analyzátoři stacionární, přenosné nebo ruční

3.1. Ruční analyzátoři

Nejjednodušším typem analyzátoru jsou ruční. Díky jejich snadné přenositelnosti můžeme provádět základní měření, která nám dávají rychlý přehled o jednotlivých parametrech kvality v síti. Přístroje měří jednofázové nebo třífázové soustavy. [28]

3.2. Stacionární analyzátoři

Pevné analyzátoři neboli stacionární analyzátoři, jsou určeny pro trvalé monitorování kvality v důležitých místech sítě. Nejčastěji se umísťují do míst, kde dochází k předávání energie z distribuční sítě. Proud se zde měří pomocí proudových transformátorů. Disponují menším počtem rozsahů na napěťových a proudových vstupech oproti přenosovým analyzátorům. Obvykle jsou pro tyto analyzátoři typické napěťové vstupy 57,7/100 V a přímými proudovými vstupy 1/5 A. [28][25]

3.3. Přenosné analyzátoři

Tyto analyzátoři jsou určeny pro měření na různých místech distribučních soustav. Ve většině případů se jedná o měření s delším časovým intervalem. Přenosové analyzátoři disponují jak velkým rozsahem napěťových, tak i proudových vstupů, díky čemuž mohou provádět měření na všech napěťových hladinách. Pro měření proudu se zde využívají proudové kleště se železným jádrem nebo Rogowského cívky. Ovládání a komunikace se u analyzátorů provádí propojením s PC pomocí komunikačního rozhraní. [25][28]

Dále se budeme věnovat několika přístrojům určených pro měření kvality elektrické energie.

3.3.1. Sdružený analyzátor sítí BK-ELCOM v provedení ENA330

Kompaktní analyzátor kvality elektrické energie bez displeje, který splňuje normy. Analyzátor je vybaven čtyřmi proudovými a napěťovými vstupy. K nepřímému měření proudu se používají proudové kleště nebo Rogowského cívky. Díky menším rozměrům, snadné uložení v rozvaděčích. Základní konfigurace se provádí pomocí notebooku, který komunikuje s analyzátořem pomocí USB

nebo Ethernetem. Přístroj je dále vybaven paměťovou kartou, určenou pro ukládání dat a následnému vyhodnocování.

Základní varianta firmware obsahuje FFT analyzátor harmonických, osciloskop a vektorskop, monitor výkonů a energií, měřič blikání (flickr), monitor napětí. Další dostupné moduly jsou například analyzátor signálu HDO, symetrických složek sítě, zkratové impedance sítě v místě měření, monitoring efektivních hodnot napětí, zapisovač poruchových dějů. [29]



Obrázek 34 Analyzátor kvality v provedení ENA330 [29]

3.3.2. PQ monitor MEg38/C

Tento typ analyzátoru měří čtyři napětí a čtyři proudy na hladinách nn, vn a vvn. PQ monitor je schopen analyzovat kvalitu napětí, měřit elektrickou energii včetně činných a jalových výkonů. Dále ukládá naměřená data, která zpracovává a vyhodnocuje výkony, energie a harmonické do 63 řádu. Monitory se dodávají se třídou přesnosti A i S. Obě třídy přesnosti splňují normu, ale jsou mezi nimi rozdíly, které jsou dány přesnostmi měření a doporučenou dobou recalibrace. Monitor může pracovat v režimu osciloskopu se záznamem napětí a proudů. Zpracování výsledků, nastavení parametrů anebo zobrazení oscilografického záznamu provádíme pomocí programu PQ MEg. Zobrazení dat formou grafické nebo tabulkové podoby. [27]



Obrázek 35 PQ monitor MEg38/C [26]

Souprava PQ monitor MEg38/C tvoří jednotka monitoru MEg38/C s vestavěným zdrojem k zajištění napájení, dále snímače proudu, antény, napěťové prodloužení, kontaktní prvky a adaptéry. Pro měření fázových proudů se využívá trojice snímačů, zatímco pro měření proudu např. středního

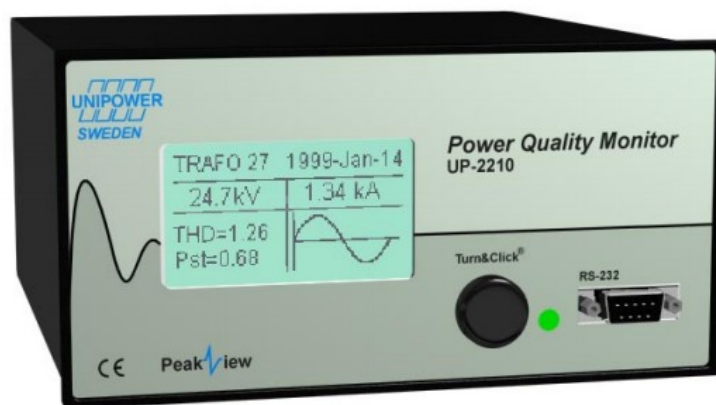
vodiče je určen samostatný snímač. Máme 3 typy snímačů proudu. Prvním z nich je ohebný snímač, který se používá pro měření proudů v rozmezí od 10 A do 3000 A. Druhým typem jsou klešťové transformátory se jmenovitým proudem 1 A a 5 A. A posledním typem jsou toroidní snímače s nejvyšší přesností měření. [27]

Tabulka 4 Nejistota měření a měřicí rozsahy parametrů kvality napětí PQ monitoru [27]

Parametr	Třída	Nejistota měření	Měřicí rozsahy
Frekvence	A	± 2 mHz	42,5 Hz – 57,5 Hz
	S	± 10 mHz	42,5 Hz – 57,5 Hz
Napětí	A	$\pm 0,1$ % U_n	10 % U_n – 150 % U_n
	S	$\pm 0,2$ % U_n	10 % U_n – 150 % U_n
Fliker P_{st} , P_{lt}	A	5 %	(0,2 – 10)
	S	7,5 %	(0,4 – 40)
Napěťové jevy	A	Amplituda: $\pm 0,2$ % U_n Trvání: ± 1 perioda	5 % U_n – 200 % U_n 0,02s – 60 s
	S	Amplituda: $\pm 0,5$ % U_n Trvání: ± 1 perioda	5 % U_n – 150 % U_n 0,02s – 60 s
Přerušení	A	Trvání: ± 1 perioda	0,02s – 60 s
	S	Trvání: ± 1 perioda	0,02s – 60 s
Nesymetrie	A	$\pm 0,1$ %	0,5 % u_2 - 5 % u_2 0,5 % u_0 - 5 % u_0
	S	$\pm 0,2$ %	1 % u_2 - 5 % u_2 1 % u_0 - 5 % u_0

3.3.3. PQ Monitor UP – 2210

Jedná se o stacionární typ analyzátoru, který jednak monitoruje všechny parametry kvality sítě, tak zároveň automaticky hlásí jakékoliv poruchy. Systém PQ UP – 2210 se skládá z měřicí jednotky, která je trvale nainstalována v místě měření a komunikuje s počítačem. Přenášaná data z měřicí jednotky do počítače jsou automaticky vyhodnocovány a porovnávány s požadovanými standarty dle normy. Systém pracuje s vysokorychlostní vzorkovací frekvencí 12,8 kHz, která poskytuje větší přesnost všech měřených parametrů. Mezi hlavní měřené parametry patří harmonické, přerušení napětí, kolísání napětí, poklesy napětí, fliker, nesymetrie. [30]



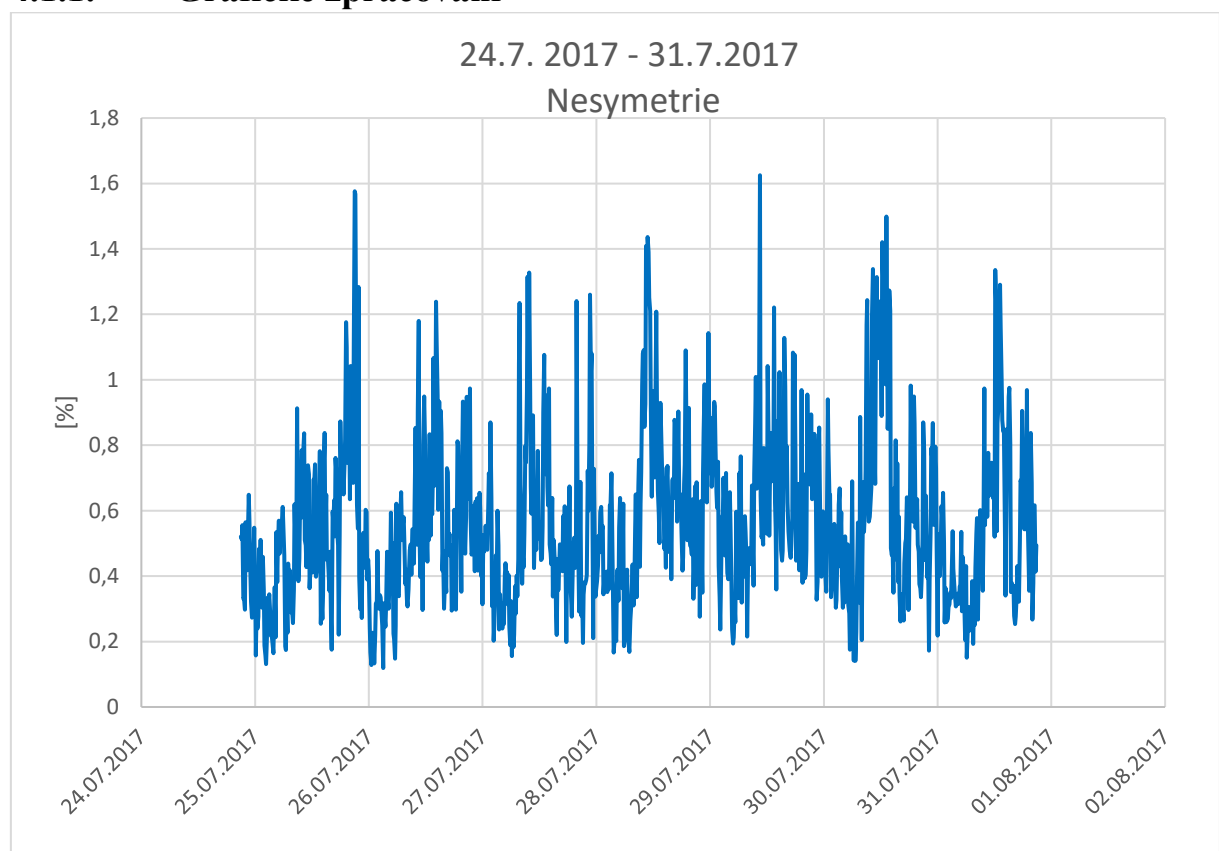
Obrázek 36 Stacionární analyzátor UP-2210 [30]

4 Vyhodnocení měření parametrů kvality v sítích s WATTroutery

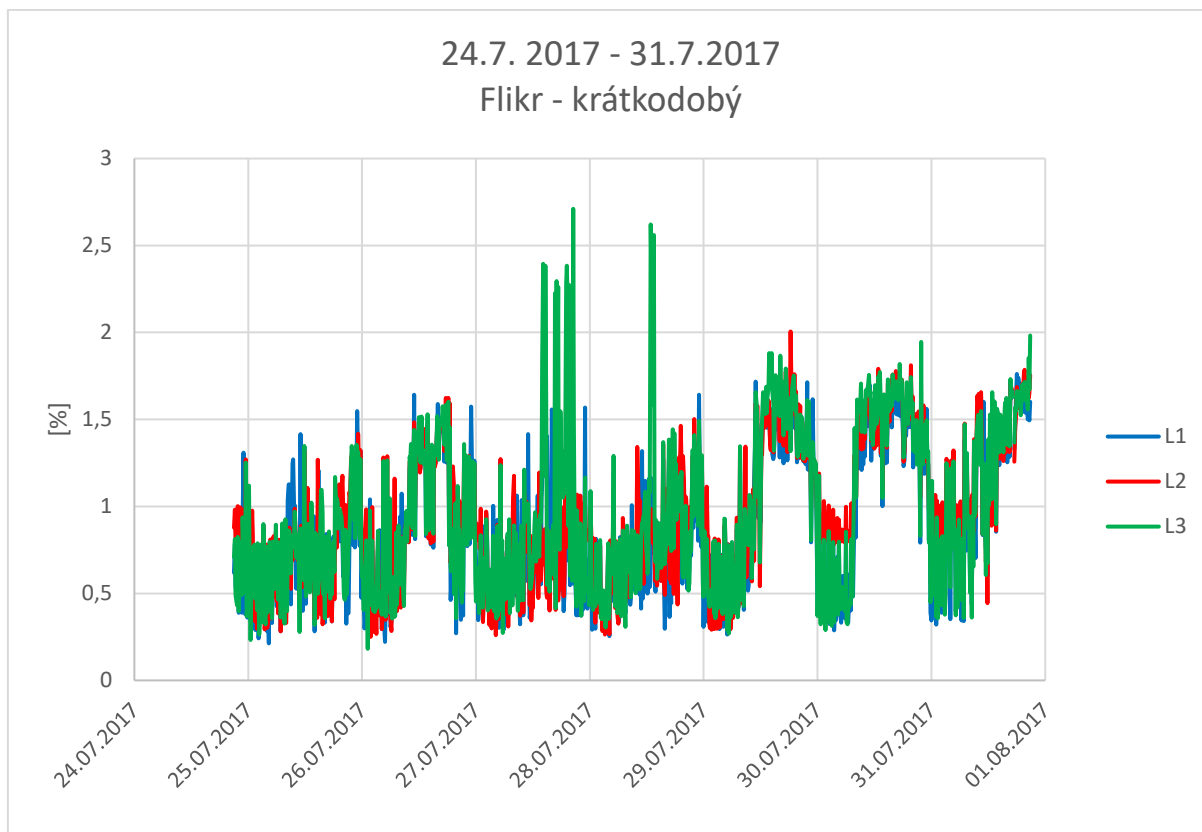
V praktické části diplomové práce bylo úkolem zpracovat data, ze 7 různých míst po České republice. Parametry, podle kterých jsme vyhodnocovali kvalitu elektrické energie, byly nesymetrie, flickr a celkové harmonické zkreslení společně s harmonickými do 15. řádu. Měření parametrů kvality sítě se vyhodnocovalo z týdenního měření, a to v intervalech 10 minut. K vyhodnocení výsledků byly vytvořeny grafy s časovou závislostí zvolených parametrů. Přitom se kontrolovalo, jestli právě 95 % měřených dat nepřekročí limity, které jsou určeny normou ČSN EN 50160.

4.1. Místo 1

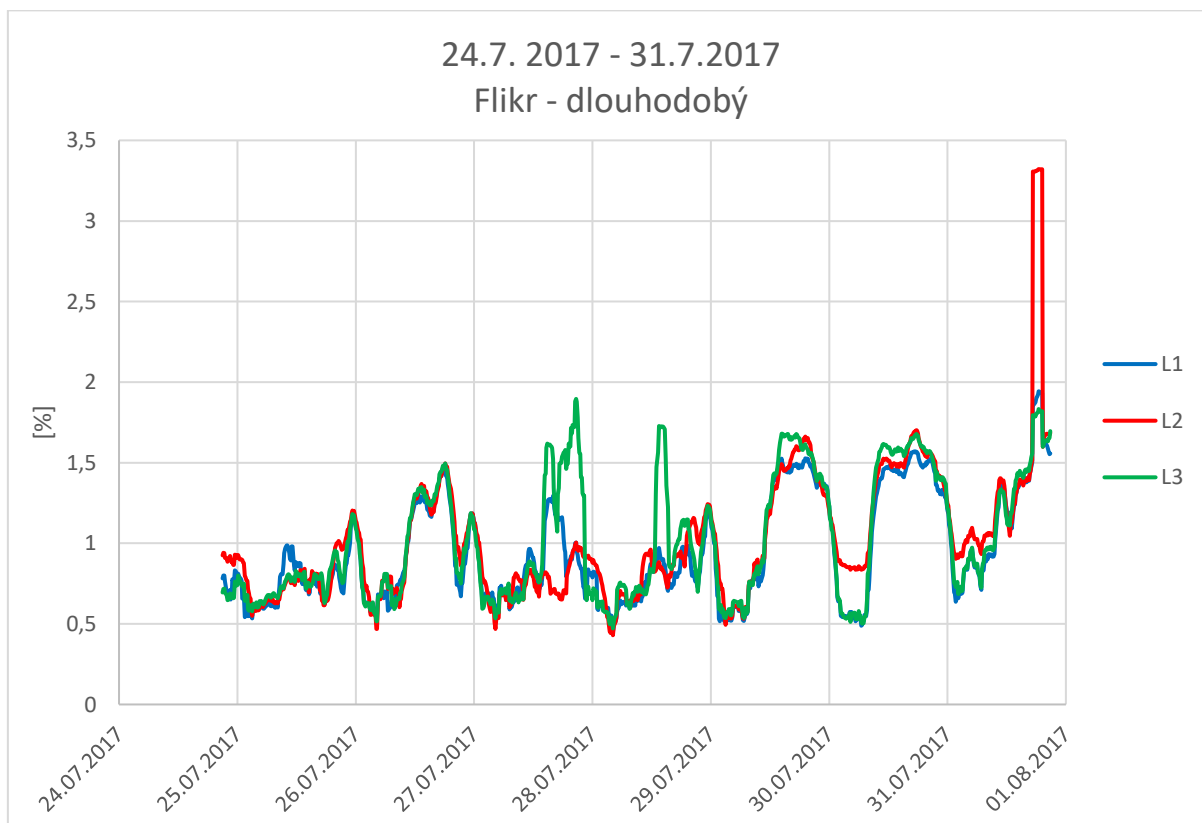
4.1.1. Grafické zpracování



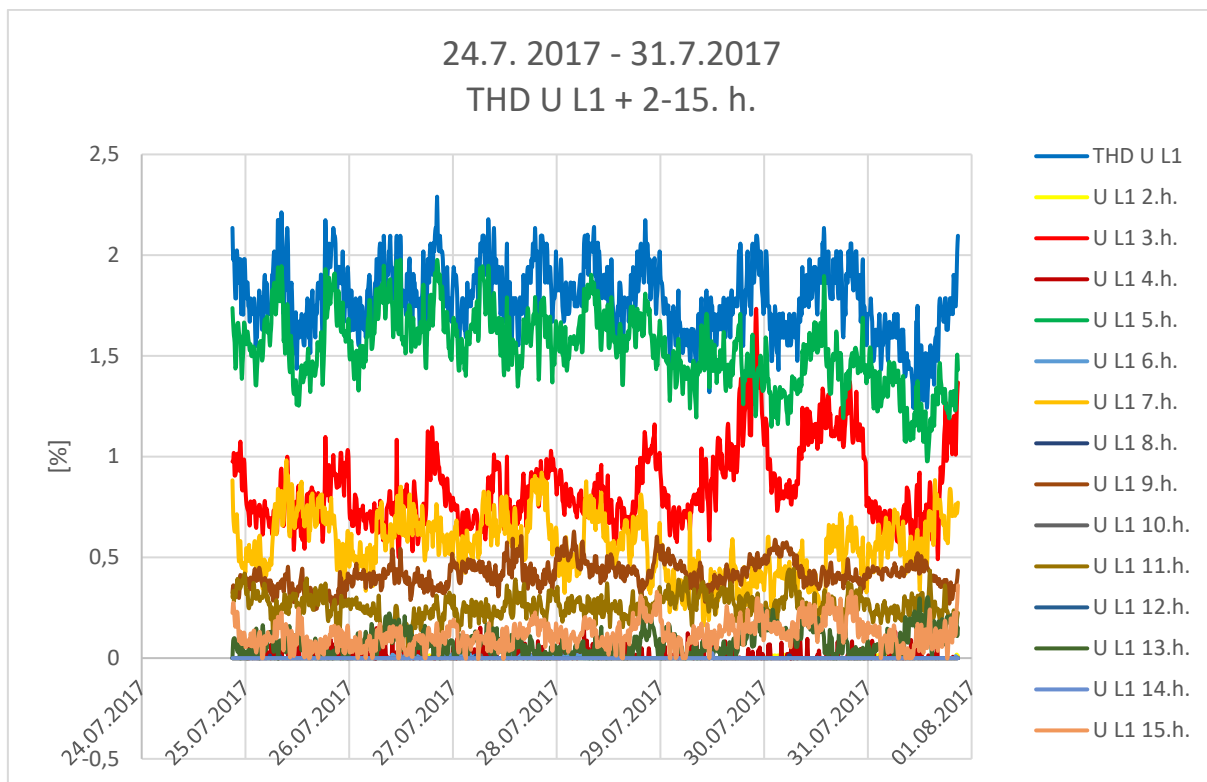
Obrázek 37 Místo 1 Průběh nesymetrie v časovém úseku 24.7.2017 – 31.7.2017



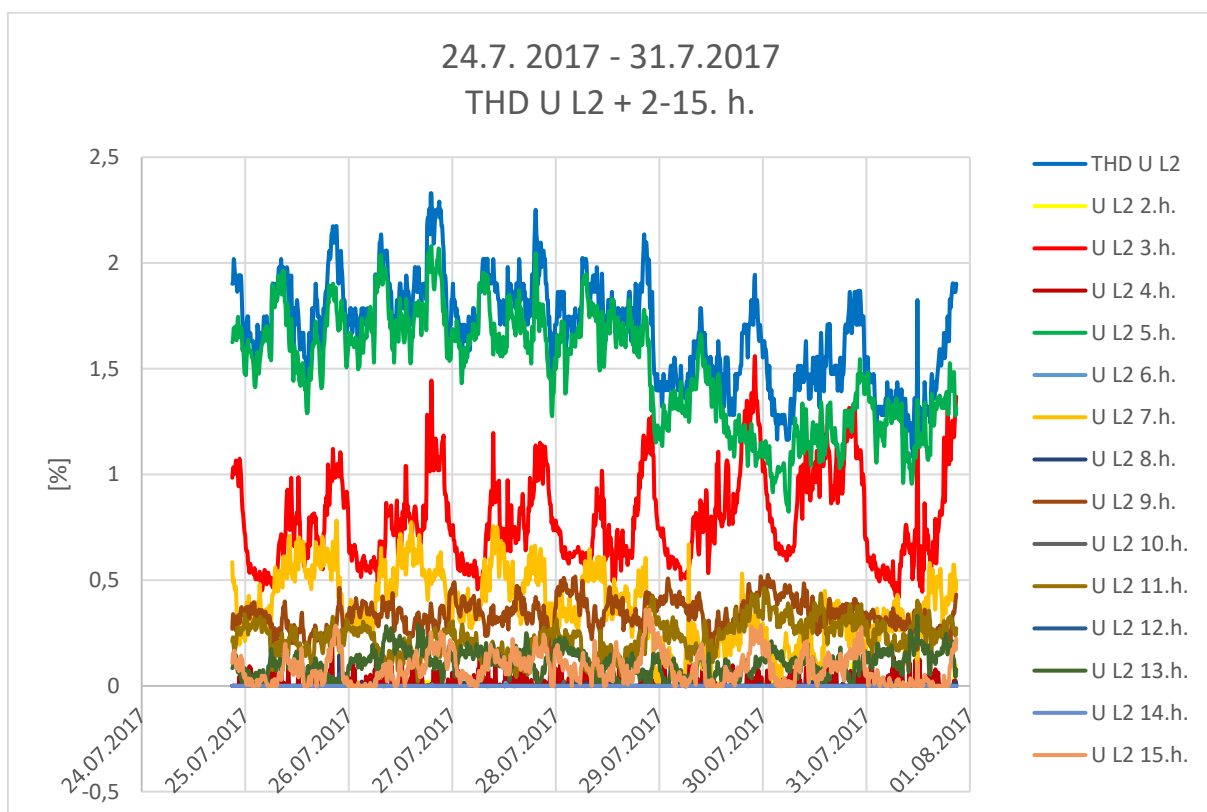
Obrázek 38 Místo 1 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 24.7.2017 – 31.7.2017



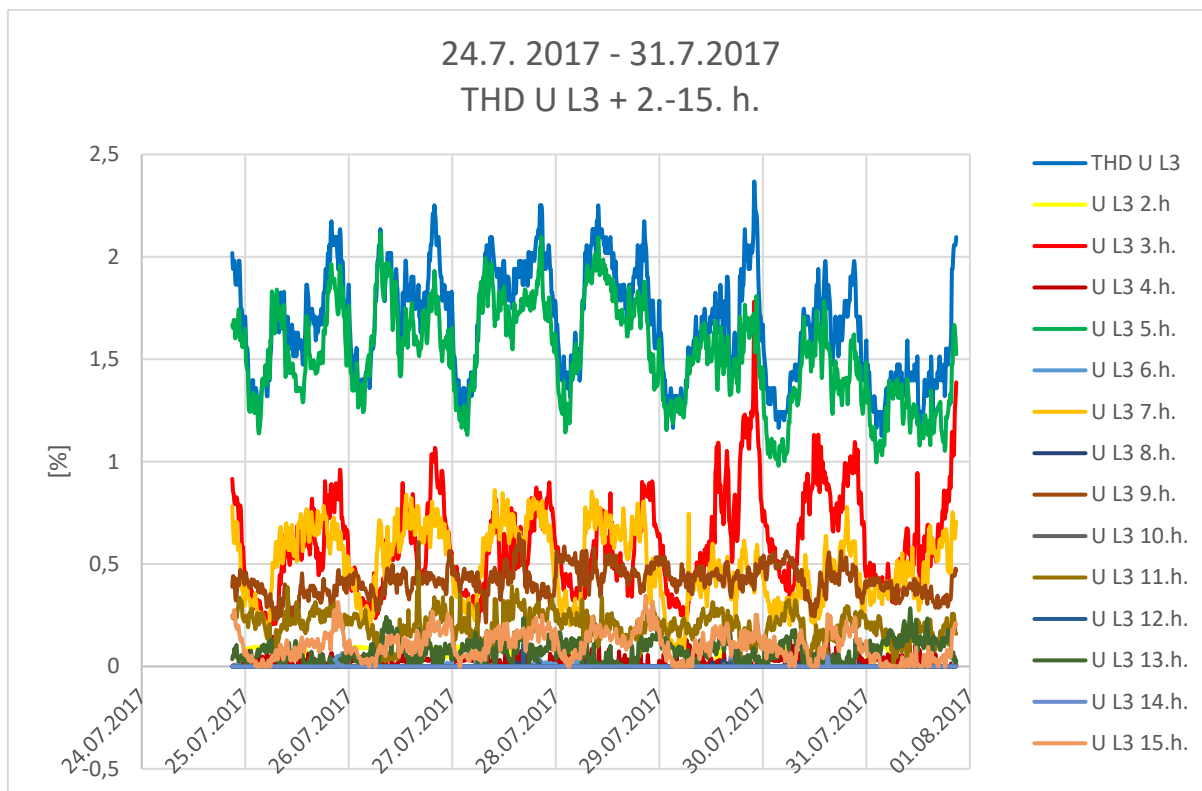
Obrázek 39 Místo 1 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 24.7.2017 – 31.7.2017



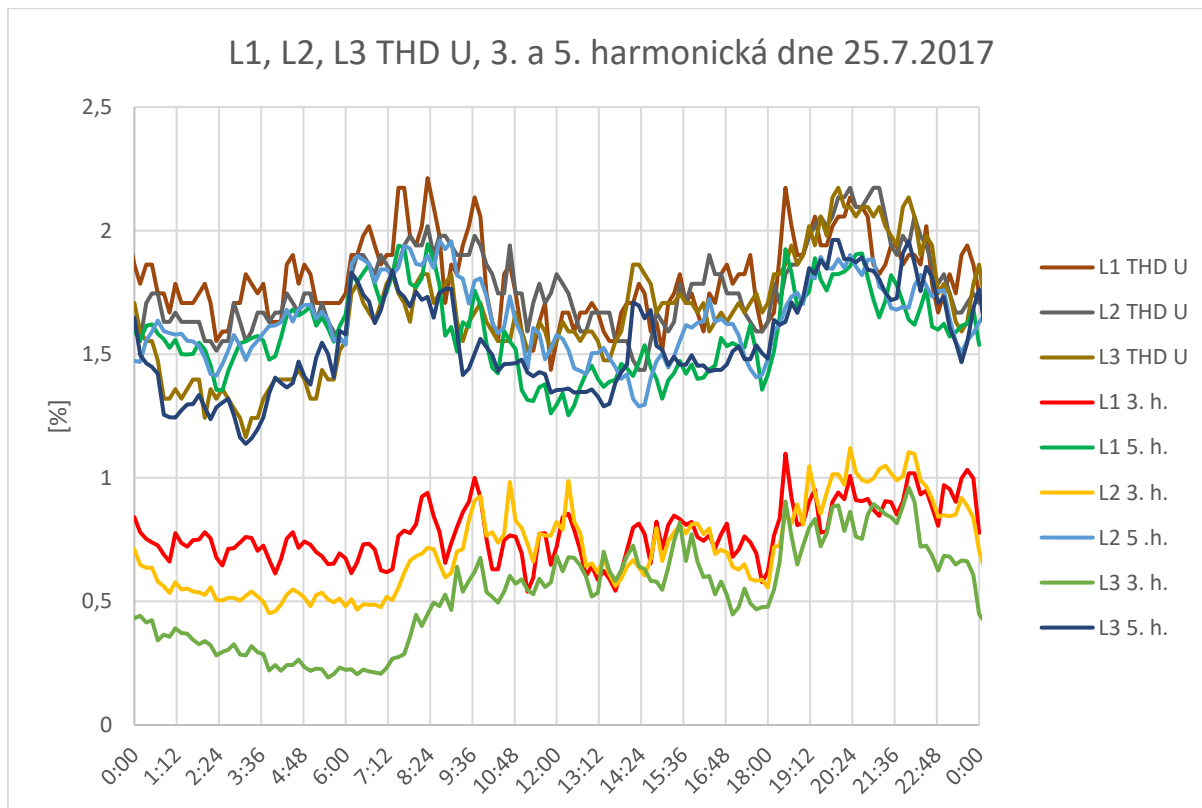
Obrázek 40 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L1 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017



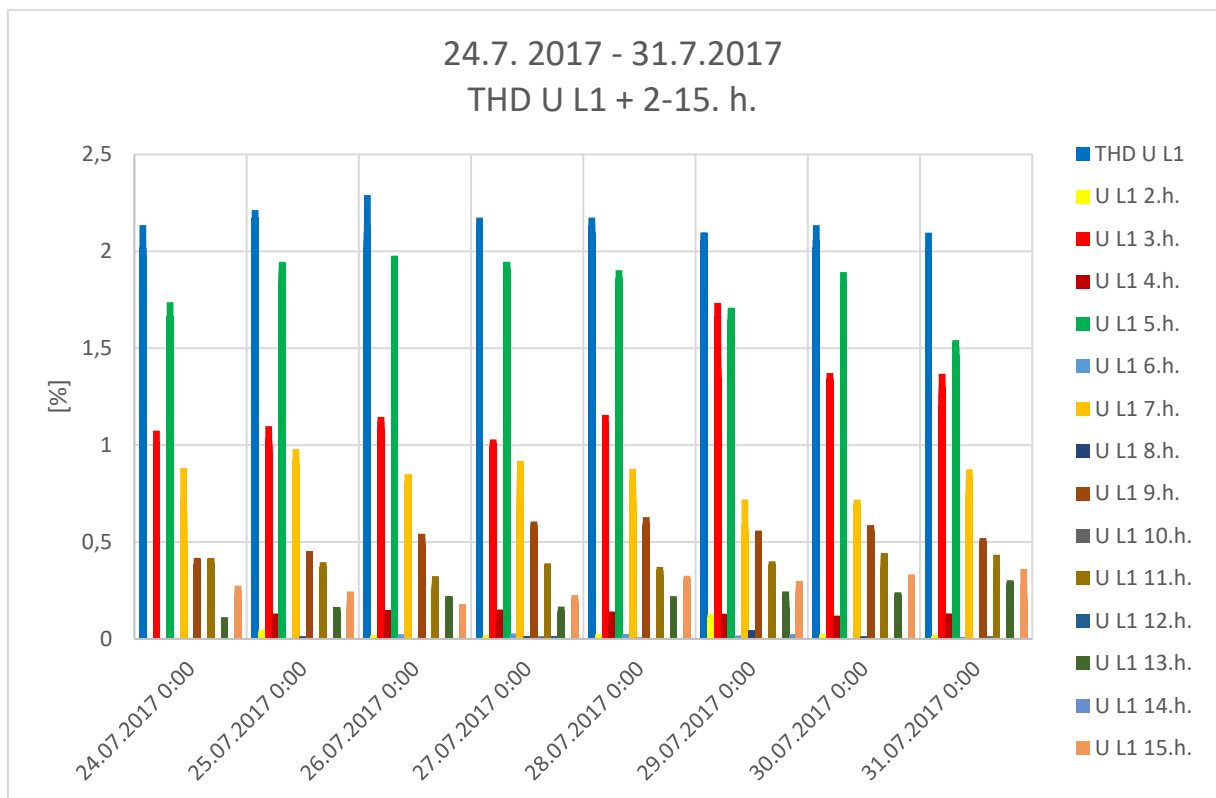
Obrázek 41 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L2 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017



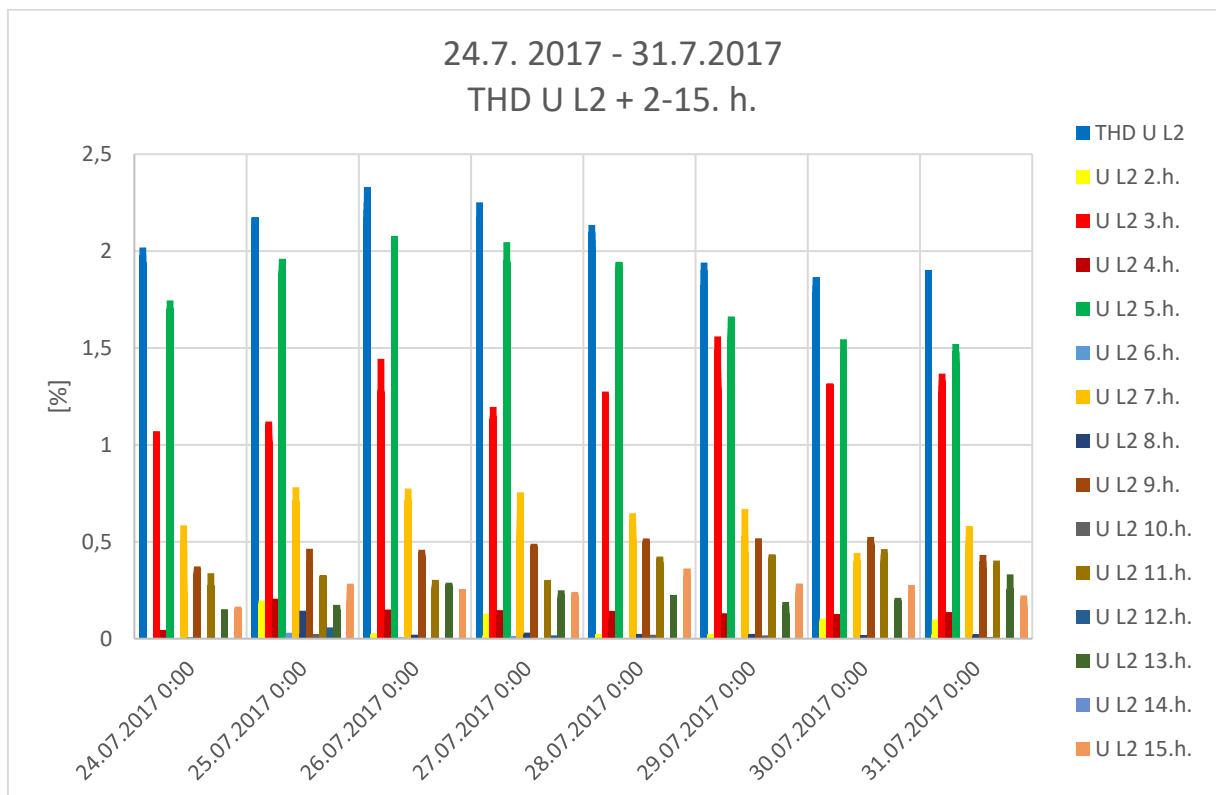
Obrázek 42 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L3 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017



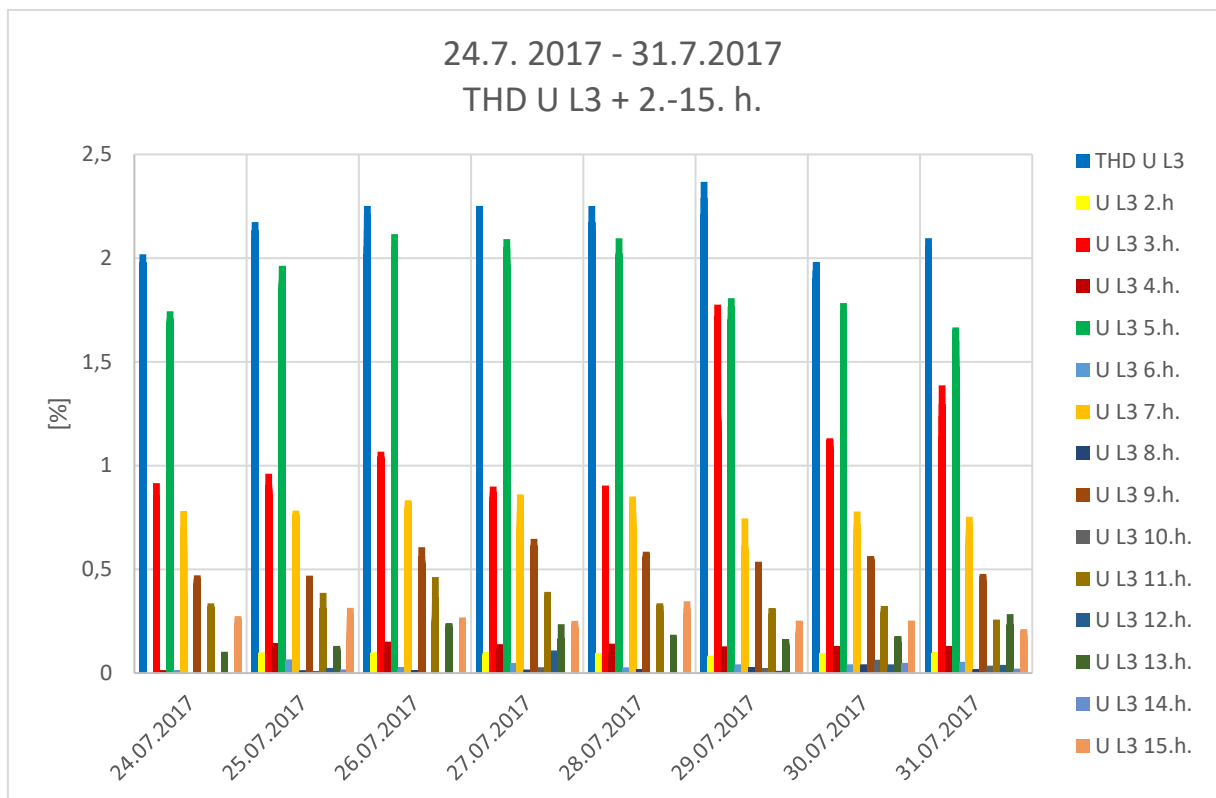
Obrázek 43 Místo 1 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 25.7.2017 pro fázi L1, L2, L3



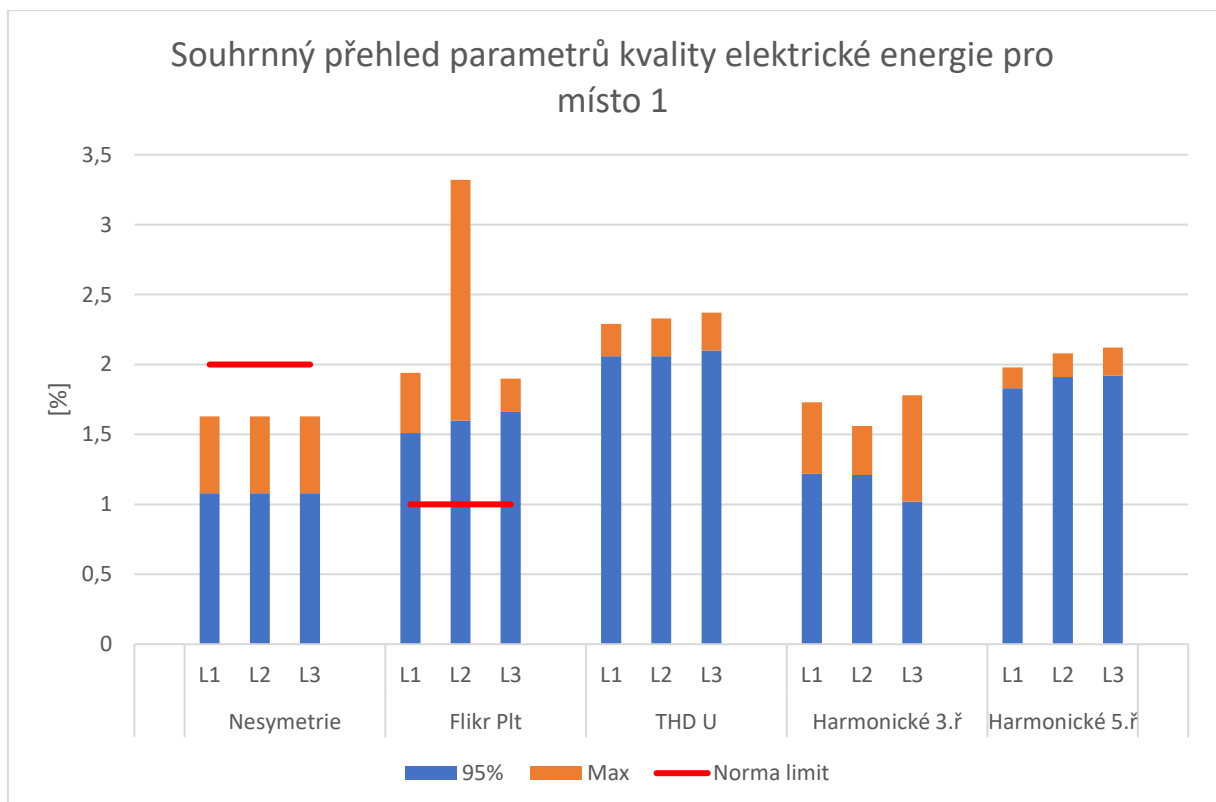
Obrázek 44 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017



Obrázek 45 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017



Obrázek 46 Místo 1 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 24.7.2017 – 31.7.2017



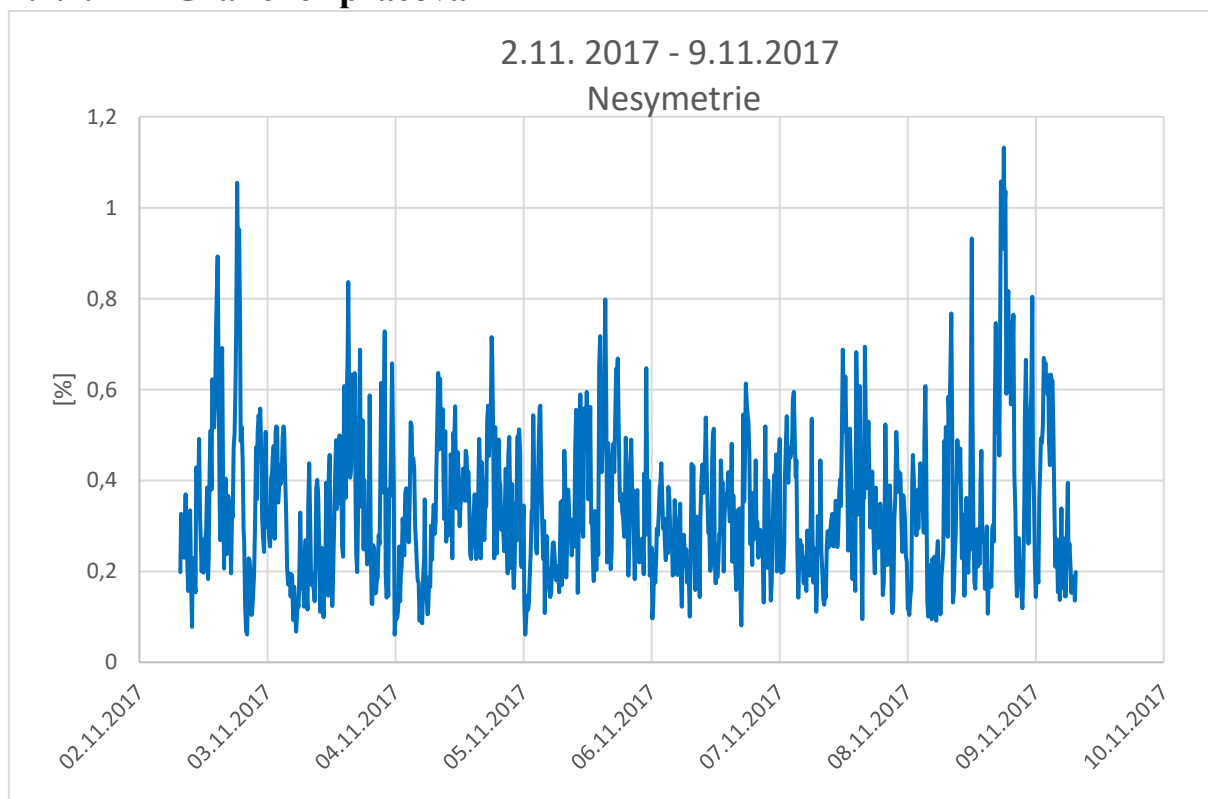
Obrázek 47 Místo 1 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie

4.1.2. Vyhodnocení

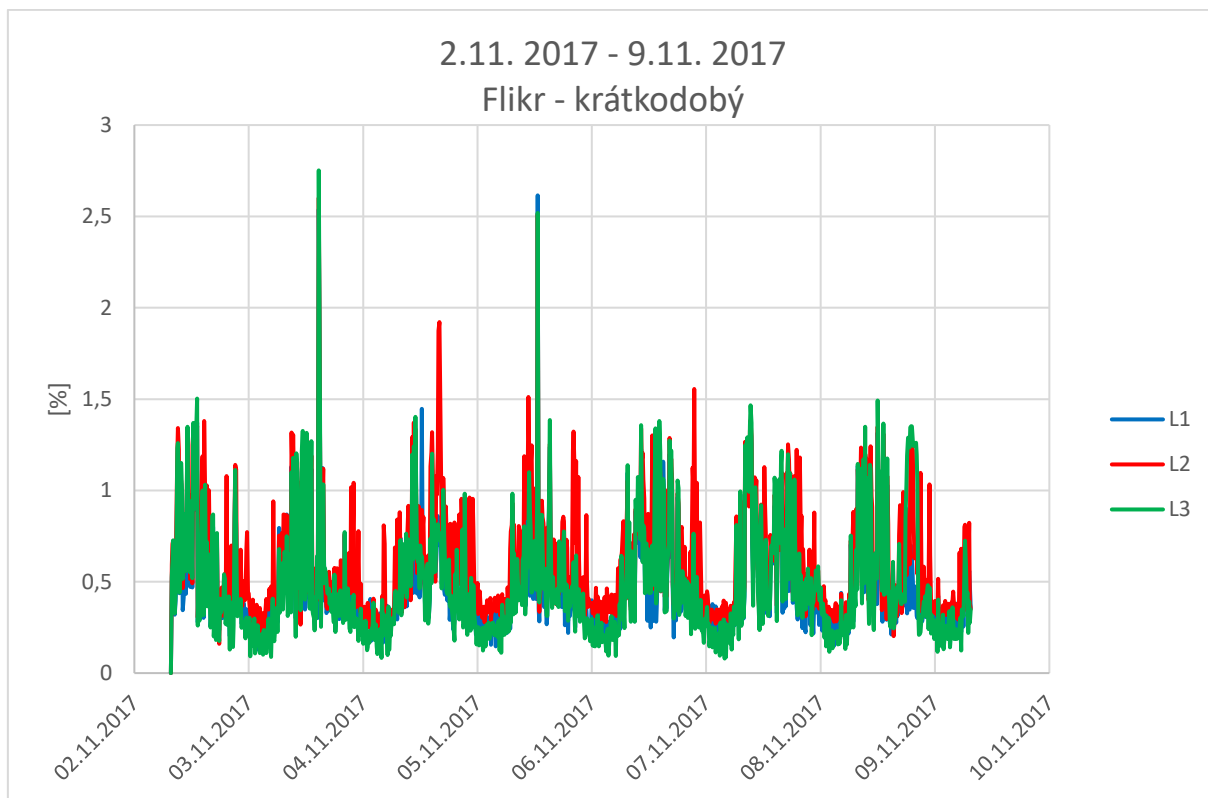
Měření v prvním zkoumaném místě probíhalo v období 24.7.2017 – 31.7.2017. Z prvního grafu nesymetrie si můžeme všimnout, že hodnoty se pohybovaly převážně v rozmezí 0,2 – 1,2 %, ale nejvyšší hodnoty, a to 1,6 %, dosáhla 29.7. v dopoledních hodinách. Následující dva grafy zobrazují parametr flickr z hlediska krátkodobého i dlouhodobého. Dle normy nás zajímá pouze flickr dlouhodobý, krátkodobý zde máme pouze pro ukázkou. Dlouhodobý flickr převážně kolísá okolo 0,5 až 1,5 %, kdy k největšímu výkyvu došlo 31.7. ve večerních hodinách ve fázi L2, a to na hodnotu 3,3 %. Třetím a posledním zkoumaným parametrem byl celkový činitel harmonického zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. řádu pro každou fázi. Za měřené období si můžeme všimnout, že se hodnoty THD U pohybovaly od 1 % do 2,3 % a k větší odchylce vůči ostatním dnům došlo 29.7. a 30.7. ve všech třech fázích. Následující graf představuje rozložení THD U, 3. a 5. harmonické během dne 25.7. Na grafu můžeme vidět, že k nárůstu THD U dochází v ranních a večerních hodinách, kdy je největší nárůst spotřeby elektrické energie. Z grafů THD U a jednotlivých harmonických měla nejvyšší podíl na zkreslení 3. a 5. harmonická složka. Poslední graf představuje souhrnný přehled všech námi vybraných parametrů. Dle normy jsou definovány limitními hodnoty, kdy 95 % ze zkoumaných vzorků musí splňovat určité hodnoty. Pro nesymetrii $\leq 2 \%$, flickr $\leq 1 \%$ a THD U $\leq 8 \%$. Pro tohle místo parametr nesymetrie a THD U nepřekračují limitní hodnoty, ale flickr limit převyšuje ve všech třech fázích o 0,5 % a tedy parametr normě nevyhovuje.

4.2. Místo 2

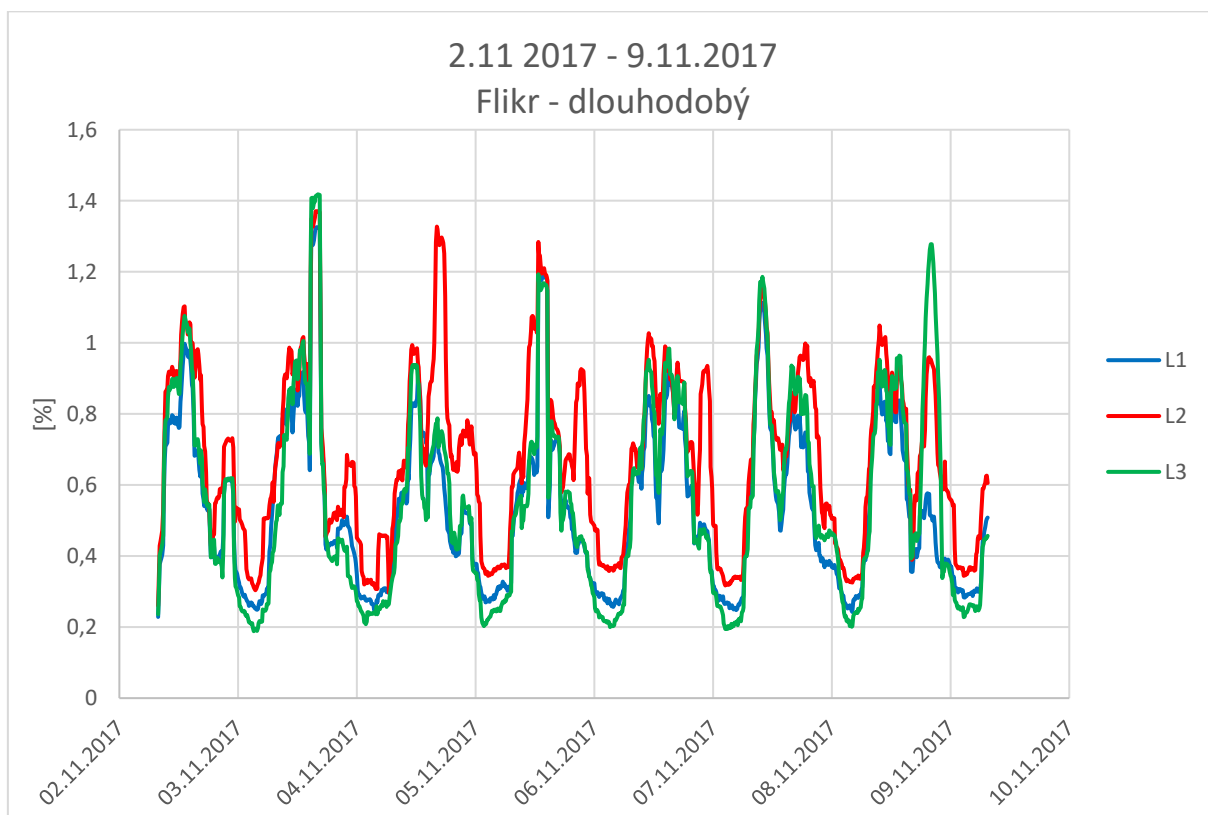
4.2.1. Grafické zpracování



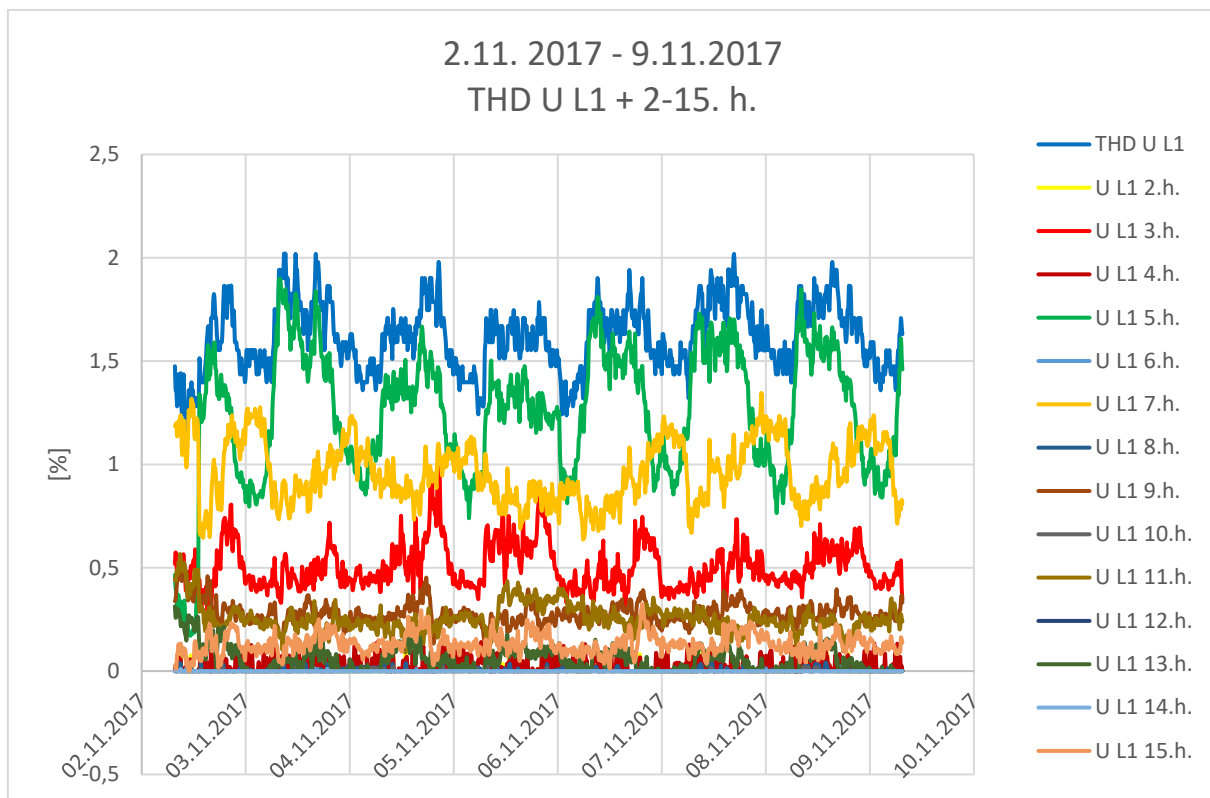
Obrázek 48 Místo 2 Průběh nesymetrie v časovém úseku 2.11.2017 – 9.11.2017



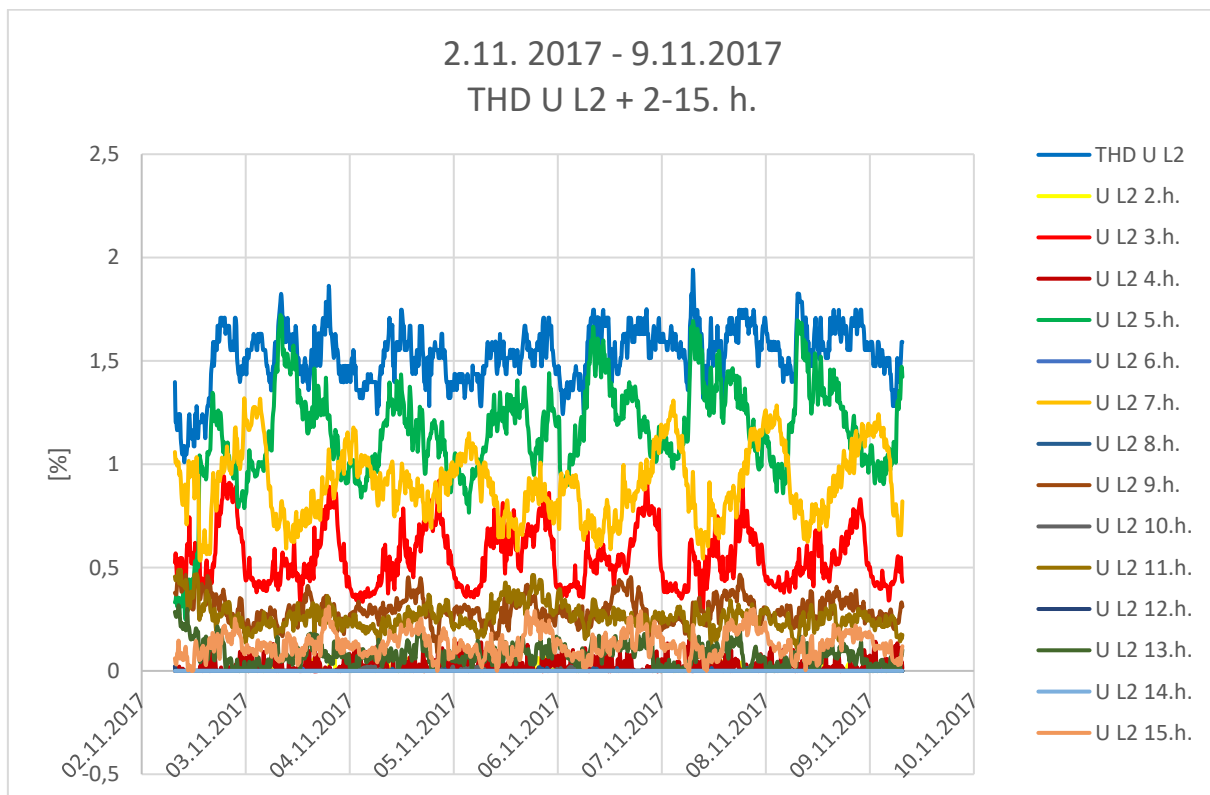
Obrázek 49 Místo 2 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 2.11.2017 – 9.11.2017



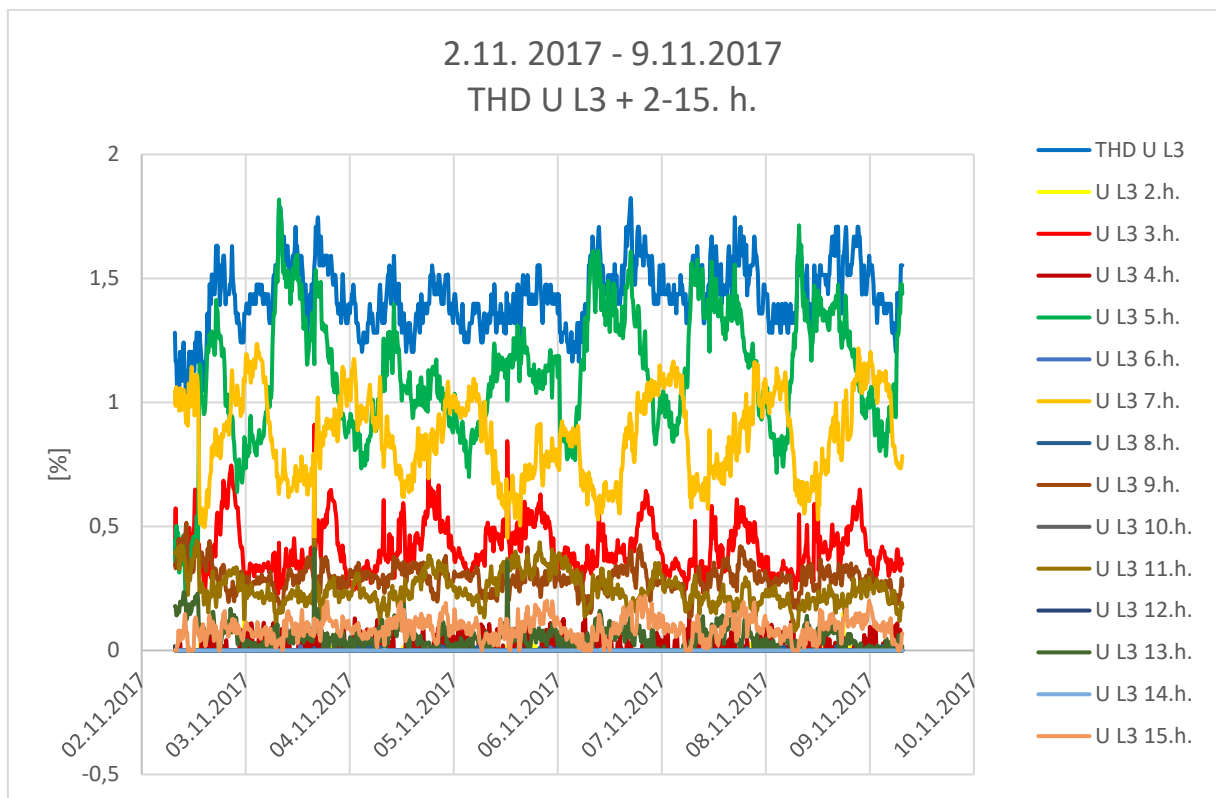
Obrázek 50 Místo 2 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 2.11.2017 – 9.11.2017



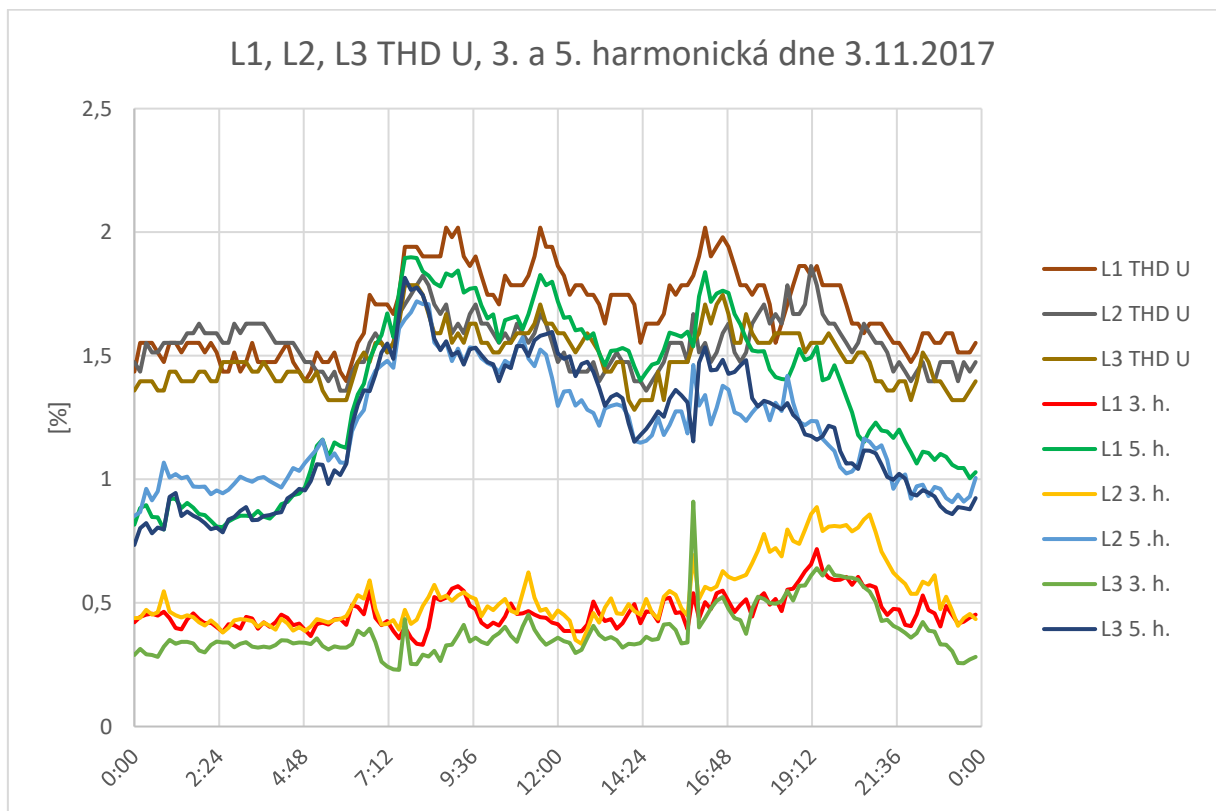
Obrázek 51 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L1 v čase 9.11.2017 – 9.11.2017



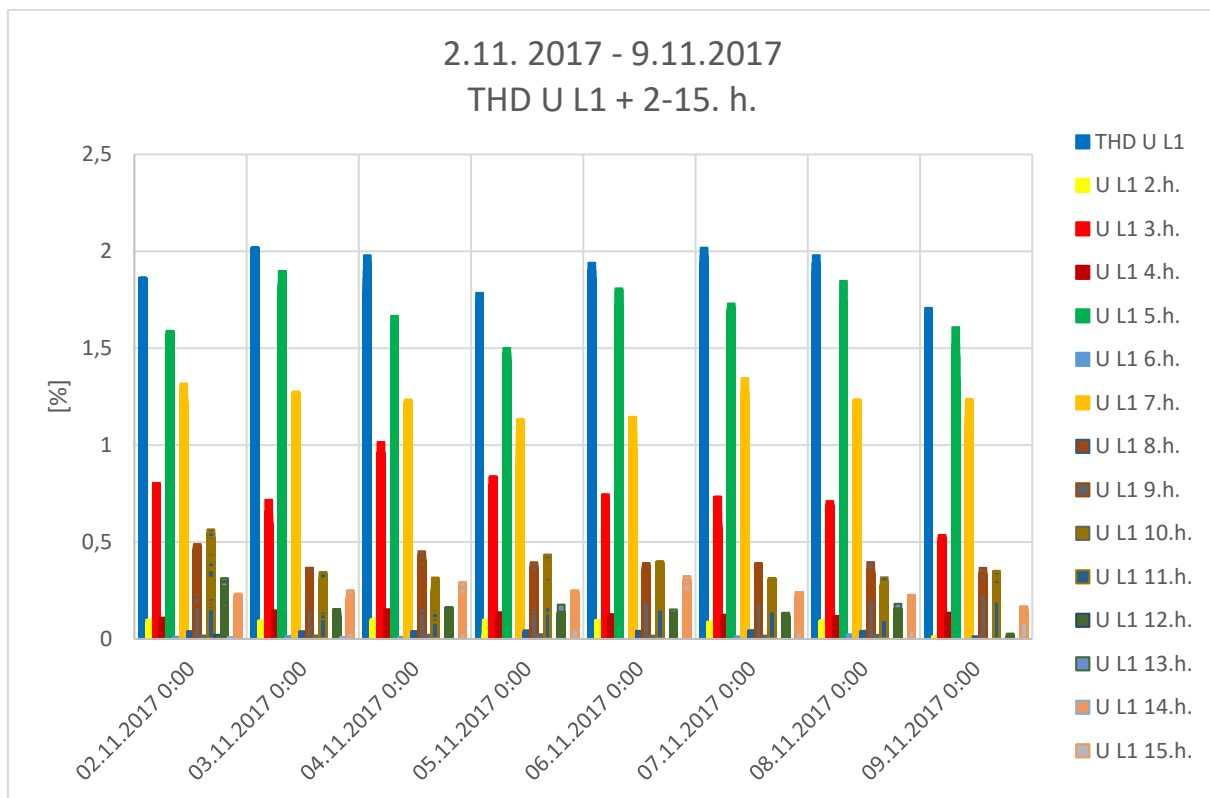
Obrázek 52 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L2 v čase 9.11.2017 – 9.11.2017



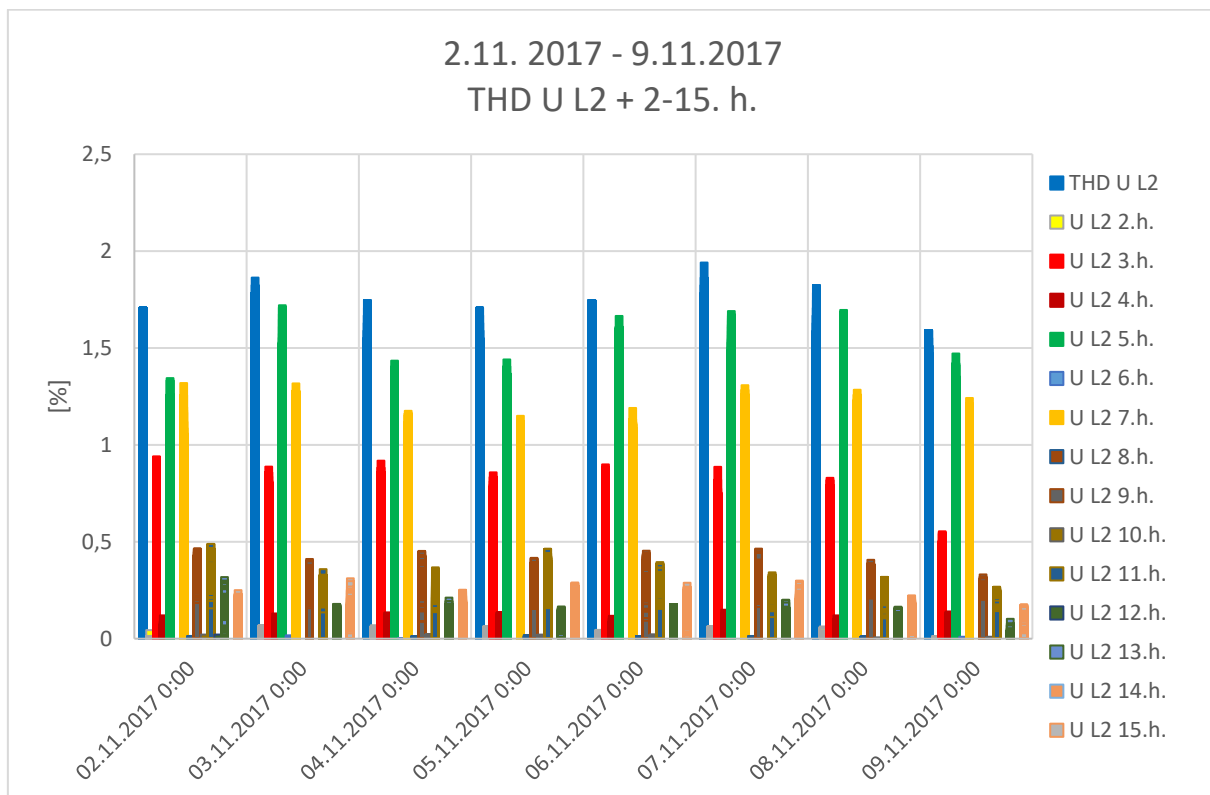
Obrázek 53 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L3 v čase 9.11.2017 – 9.11.2017



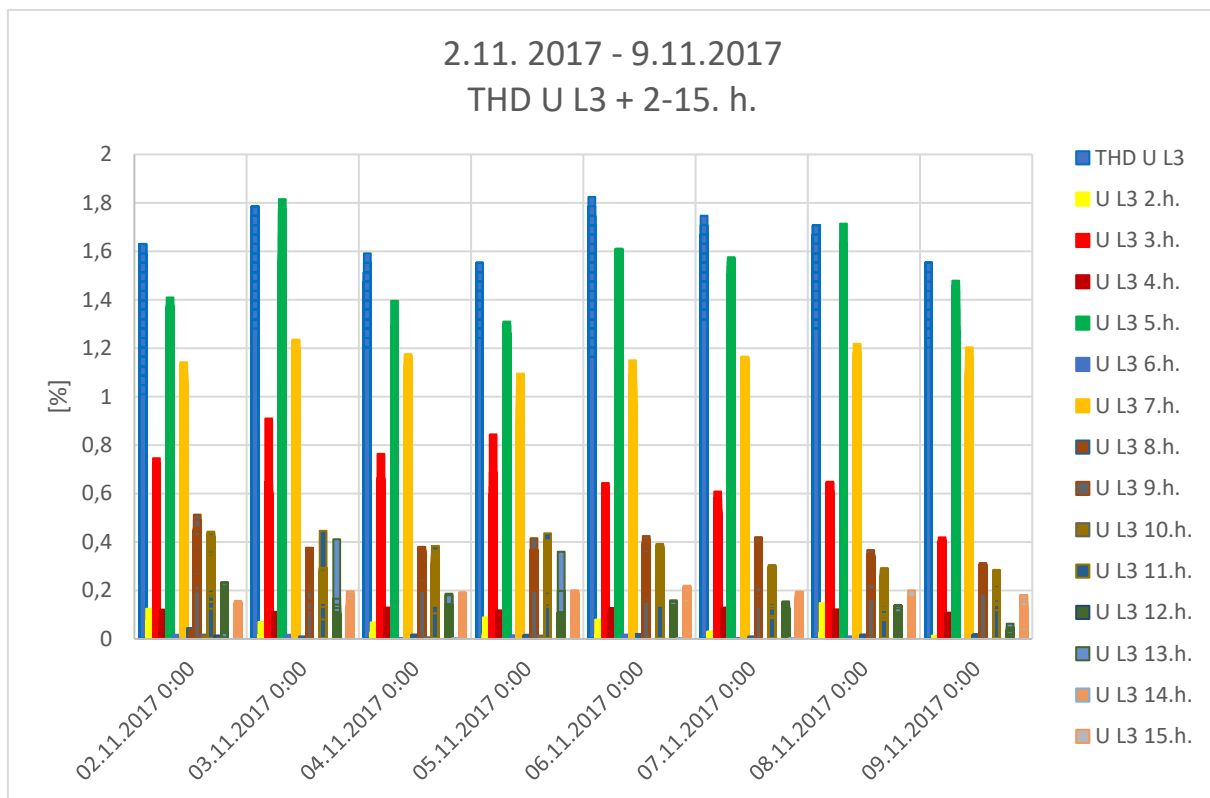
Obrázek 54 Místo 2 Průběh celkového harmonického zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 3.11.2017 pro fázi L1, L2, L3



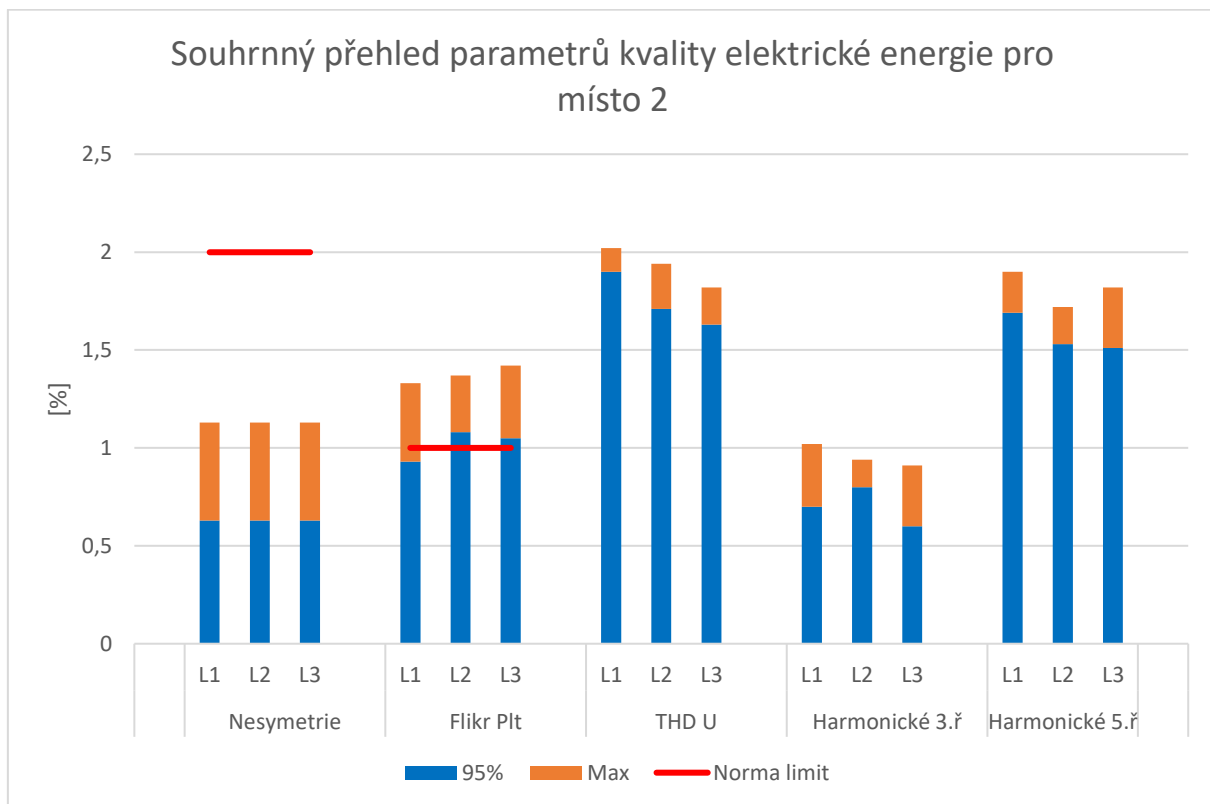
Obrázek 55 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 2.11.2017 – 9.11.2017



Obrázek 56 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 2.11.2017 – 9.11.2017



Obrázek 57 Místo 2 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 2.11.2017 – 9.11.2017



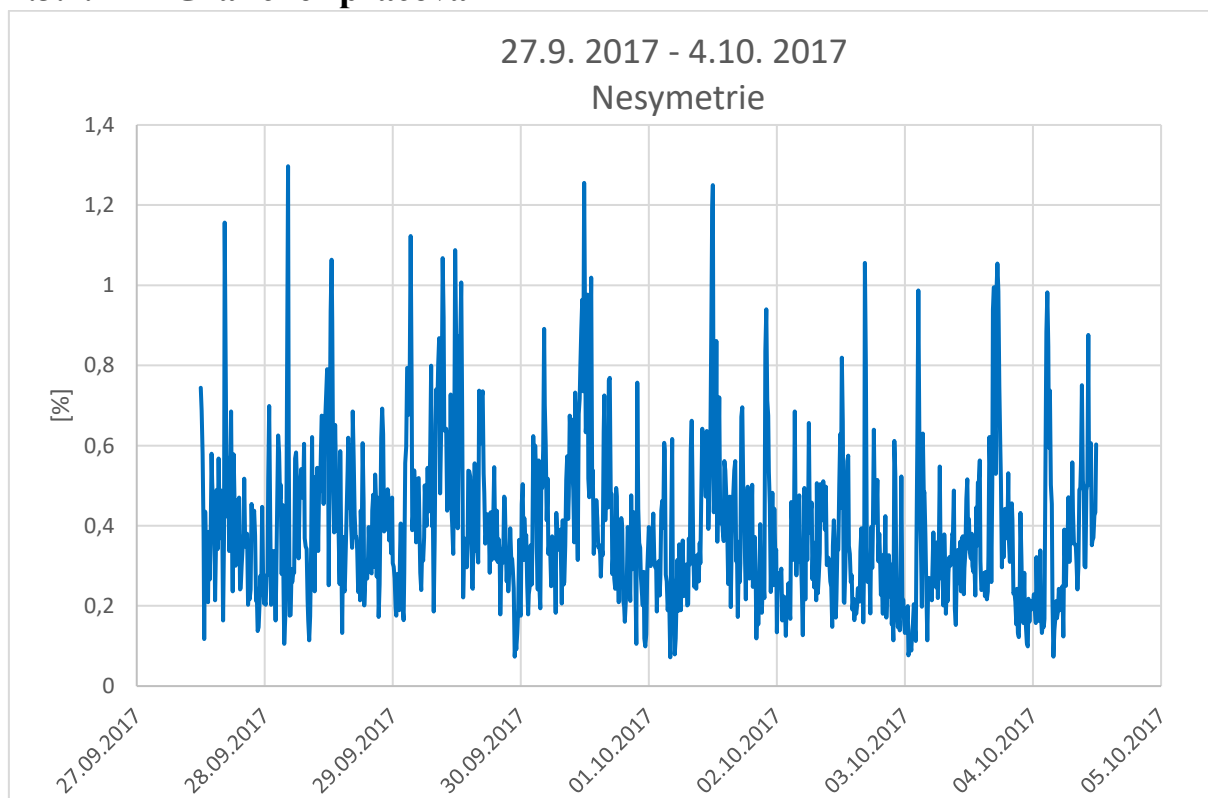
Obrázek 58 Místo 2 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie

4.2.2. Vyhodnocení

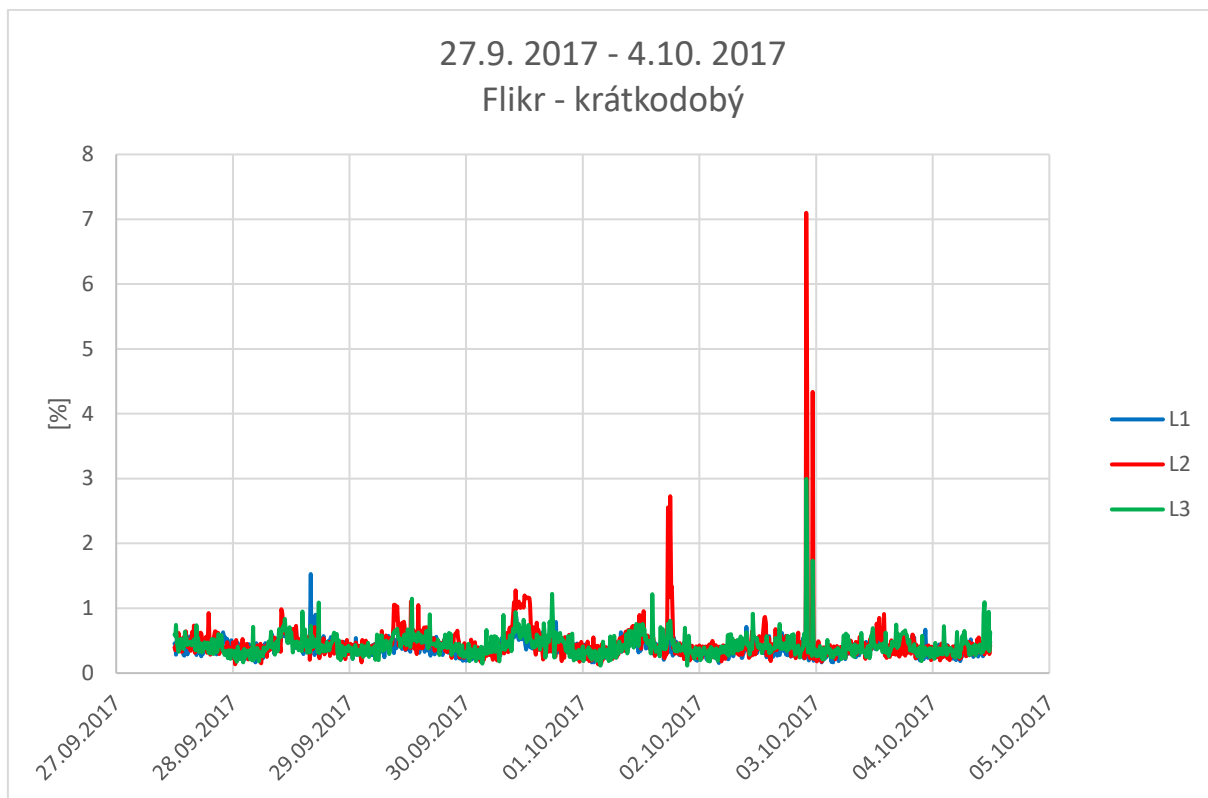
Druhé měření proběhlo v období 2.11.2017 – 9.11.2017. Zde průběh nesymetrie oproti prvnímu měření dosahuje nižších hodnot, které se pohybovaly v rozmezí 0,1 – 0,6 %. Pro dny 2.11. a 8.11. docházelo k větším výkyvům hodnot během odpoledních a večerních hodin. Nejvyšší naměřená hodnota dosáhla 1,1 %. Z grafu dlouhodobého flikru vidíme, že v ranních a večerních hodinách flikr převážně dosahoval nejnižších hodnot, a to 0,2 %, zatímco v odpoledních hodinách byly hodnoty nejvyšší, v našem případě 1,4 %. Průběh THD U a jednotlivých harmonických se během měřeného období rapidně neměnil a THD U kolísal v rozmezí 1-2 %. Průběh THD U s jednotlivými harmonickými nám opět znázorňuje, jak se měnilo zkreslení v závislosti na čase během dne. V ranních hodinách se zkreslení zvyšovalo, následně kolem druhé hodiny docházelo k jeho poklesu a v odpoledních, respektive večerních hodinách byl zaznamenán opět nárůst zkreslení. Z grafů THD U a jednotlivých harmonických měla nejvyšší podíl na zkreslení 5. a 7. harmonická složka. Poslední graf znázorňuje souhrnný přehled důležitých parametrů. Z toho vychází, že parametr nesymetrie a THD U jsou splněny, nicméně flikr překračuje limitní hodnotu ve fázi L2 a L3, a tudíž normu nesplňuje.

4.3. Místo 3

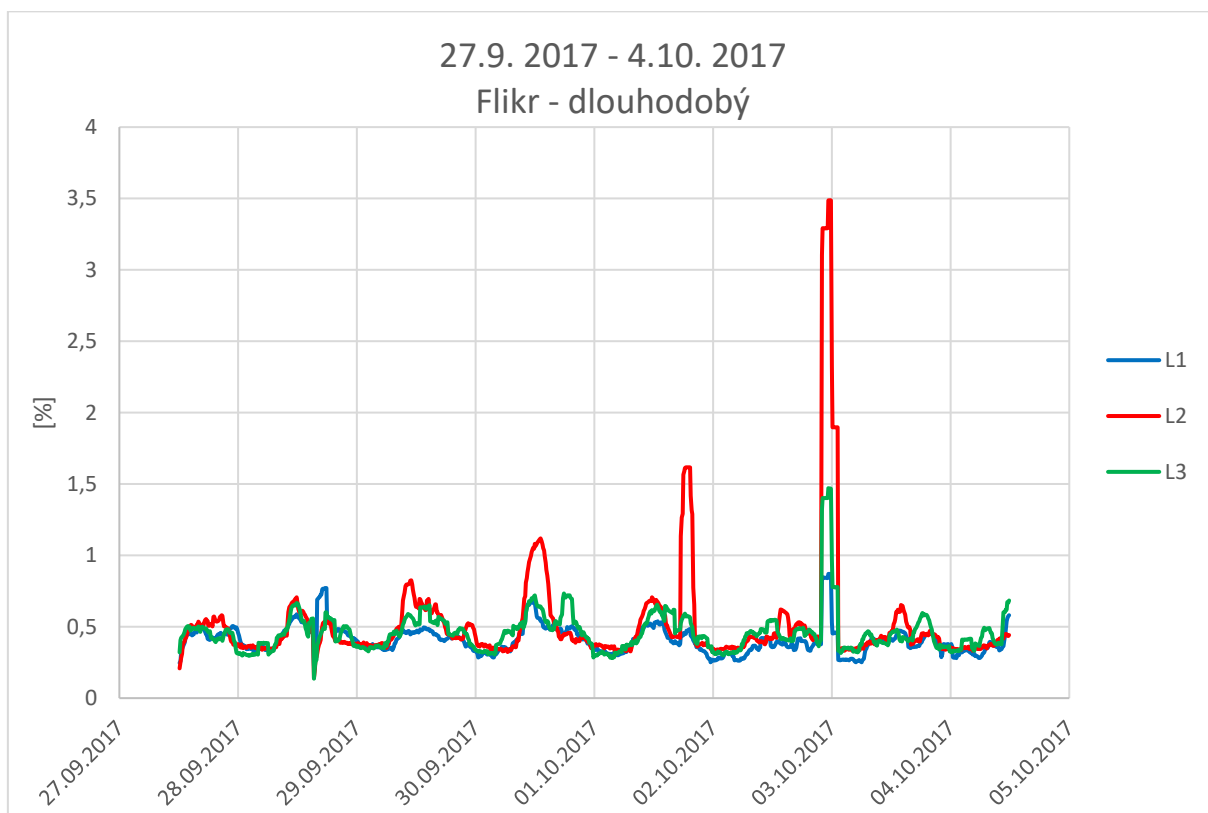
4.3.1. Grafické zpracování



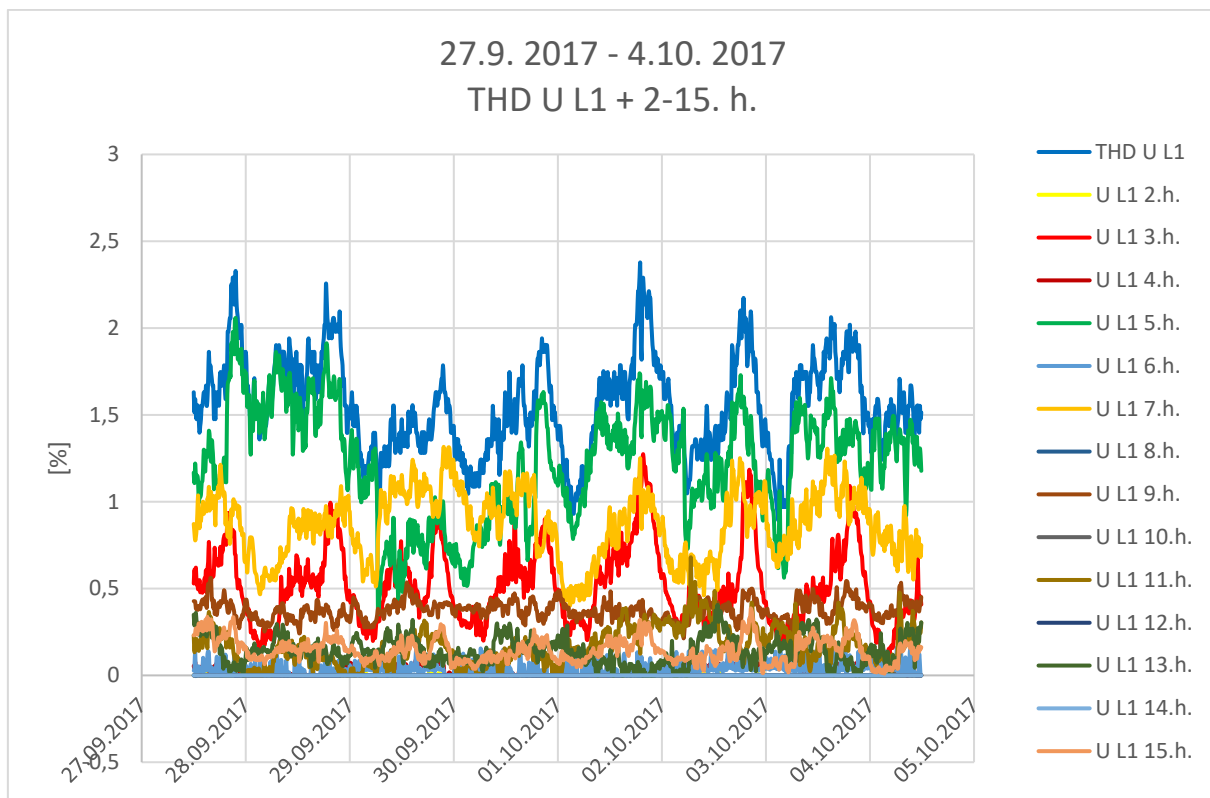
Obrázek 59 Místo 3 Průběh nesymetrie v časovém úseku 27.9.2017 – 4.10.2017



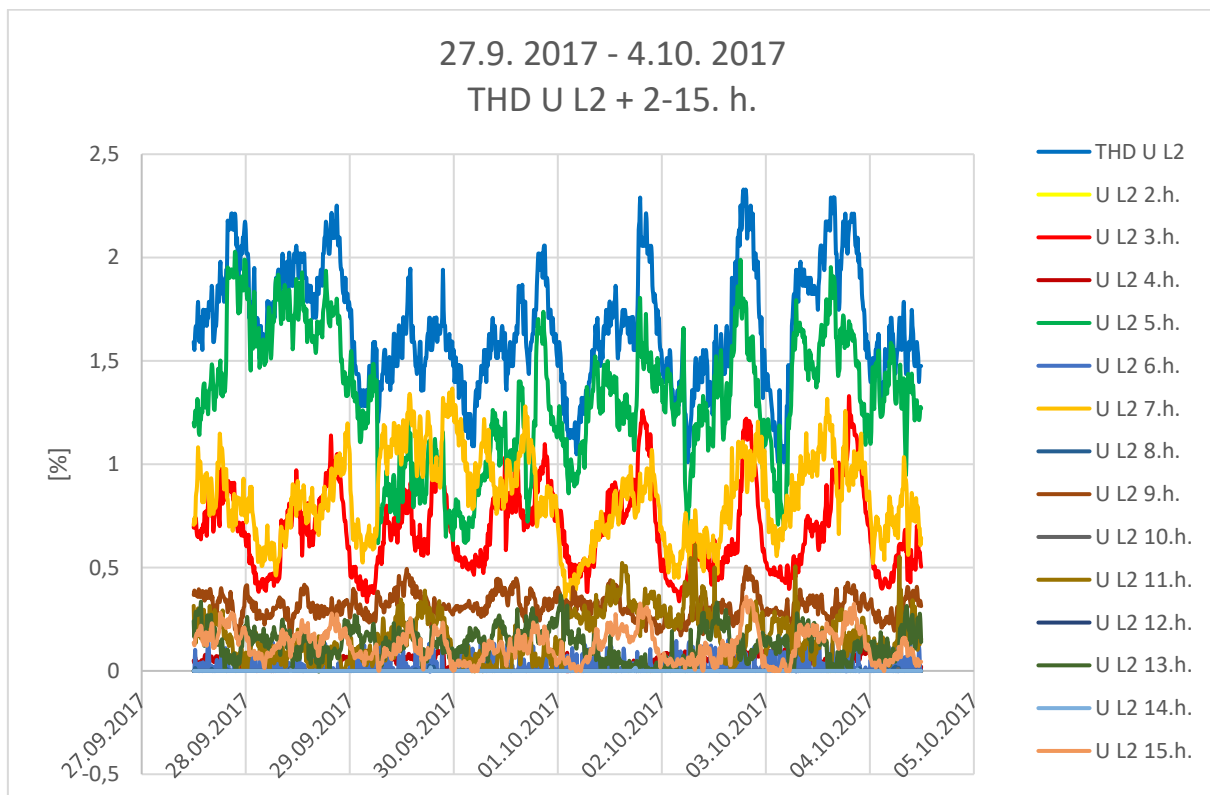
Obrázek 60 Místo 3 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 27.9.2017 – 4.10.2017



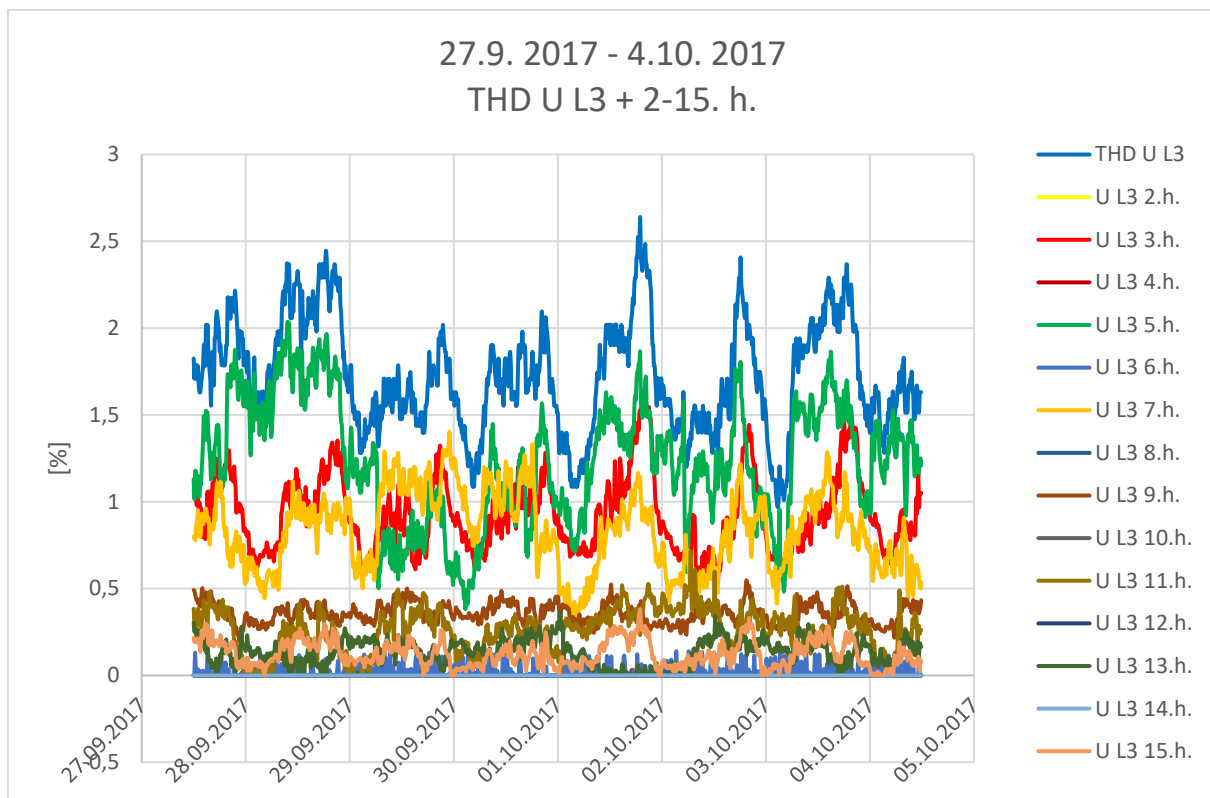
Obrázek 61 Místo 3 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 27.9.2017 – 4.10.2017



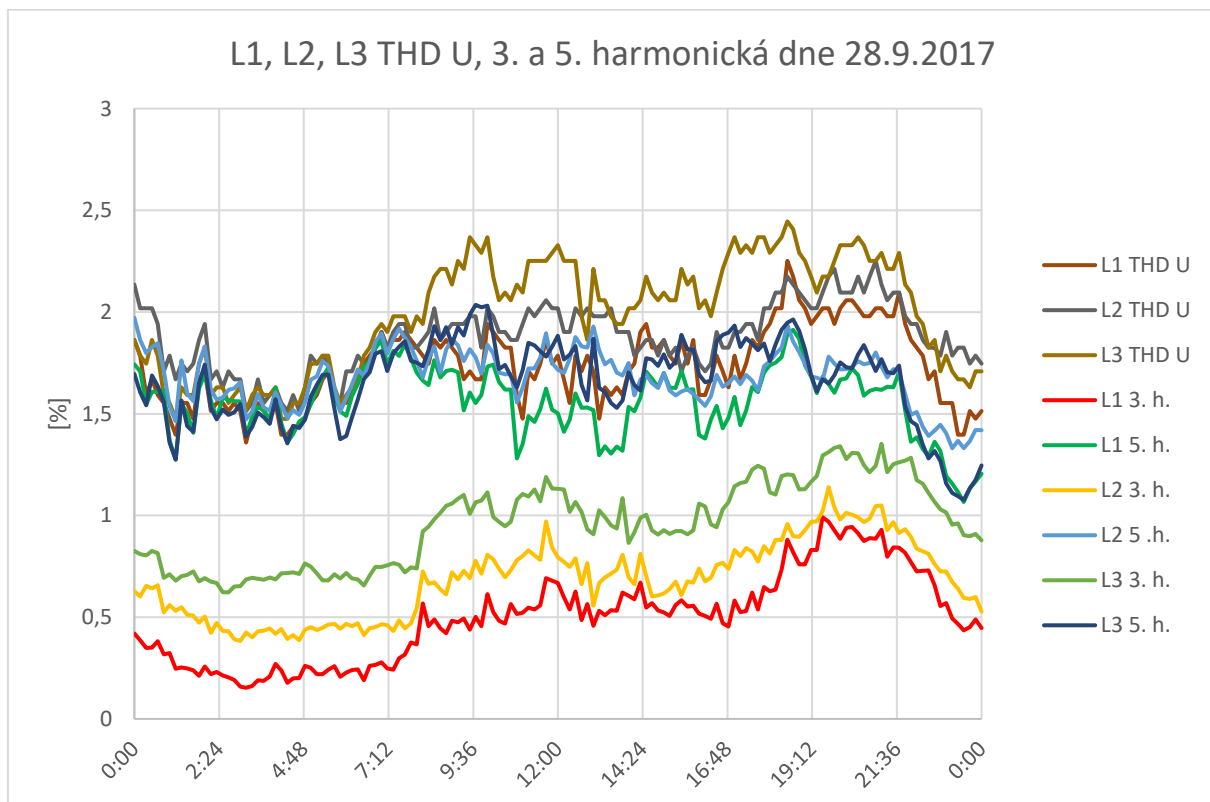
Obrázek 62 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L1 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017



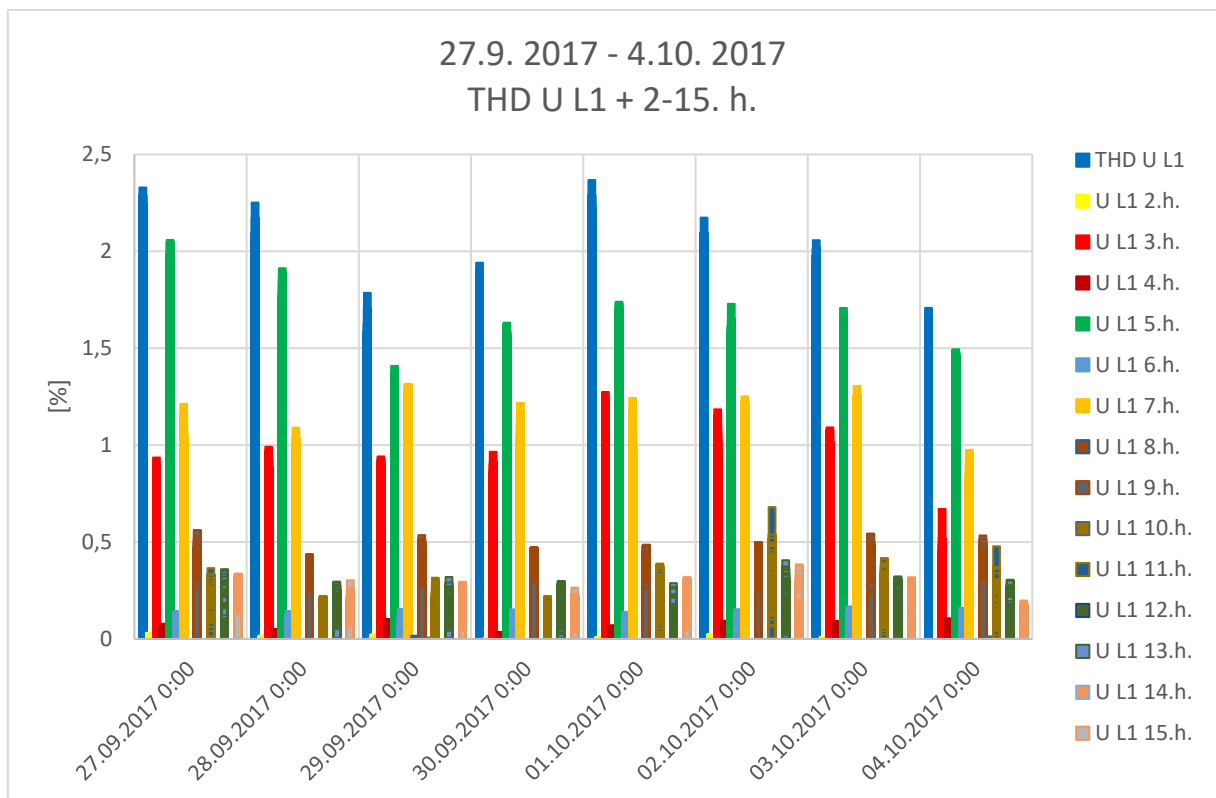
Obrázek 63 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L2 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017



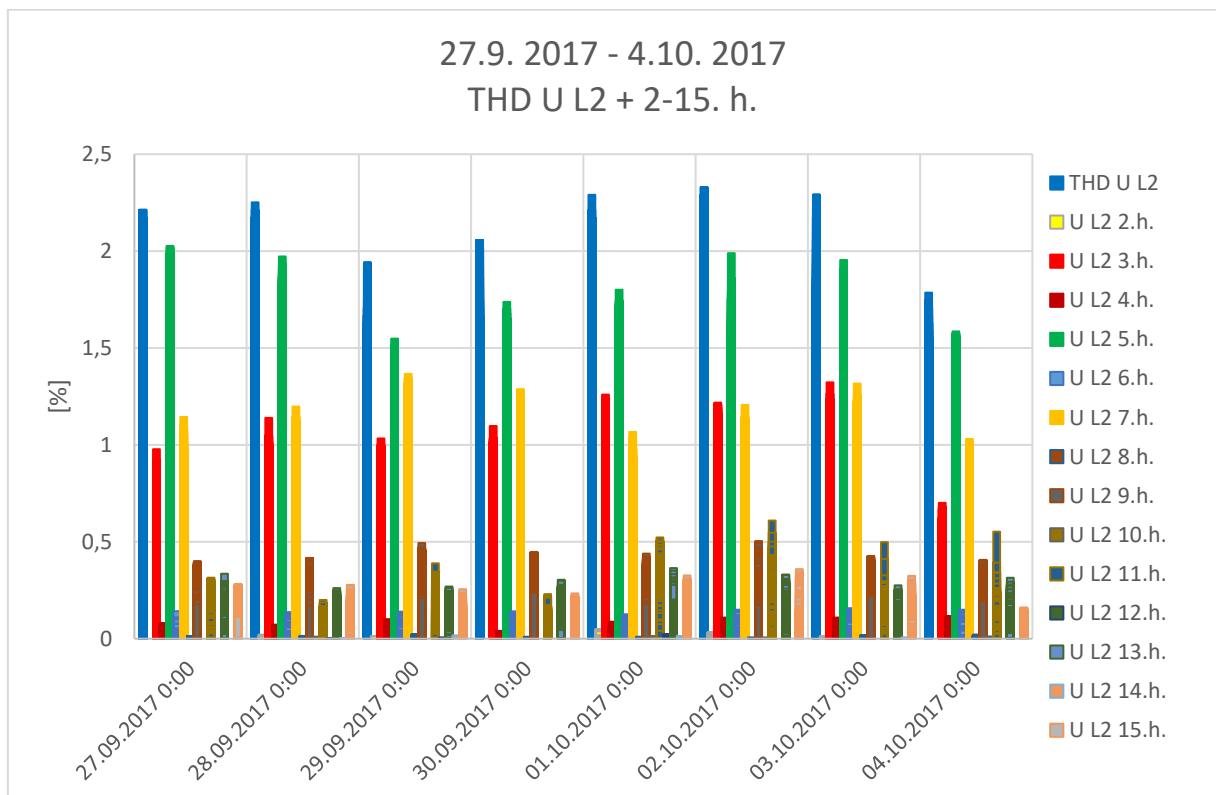
Obrázek 64 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L3 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017



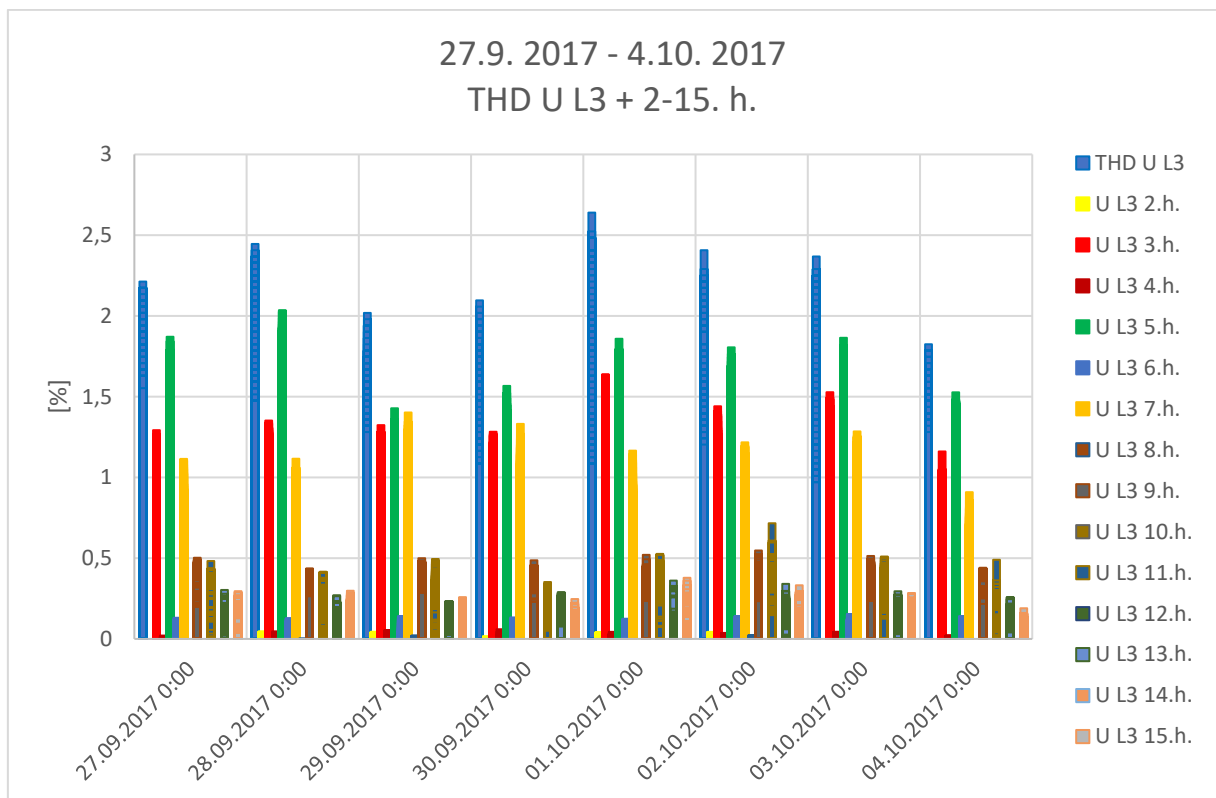
Obrázek 65 Místo 3 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 28.9.2017 pro fázi L1, L2, L3



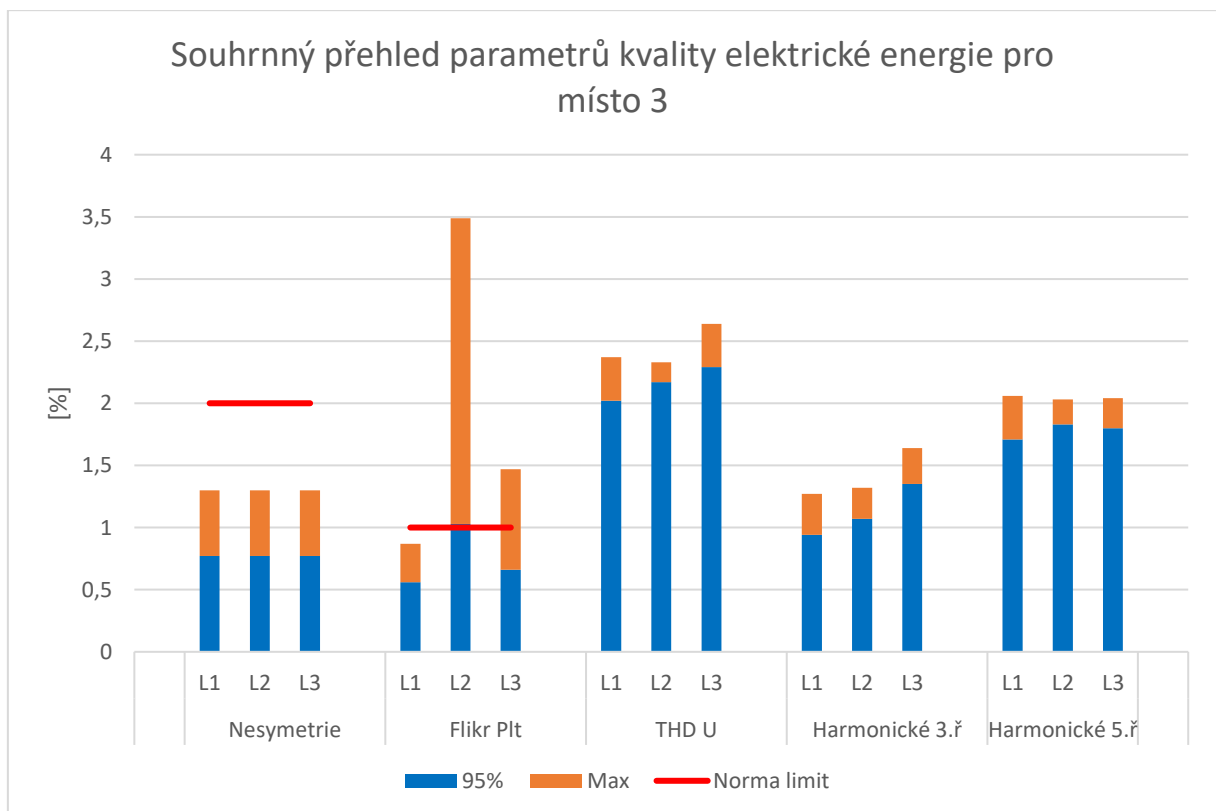
Obrázek 66 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017



Obrázek 67 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017



Obrázek 68 Místo 3 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 27.9.2017 – 4.10.2017



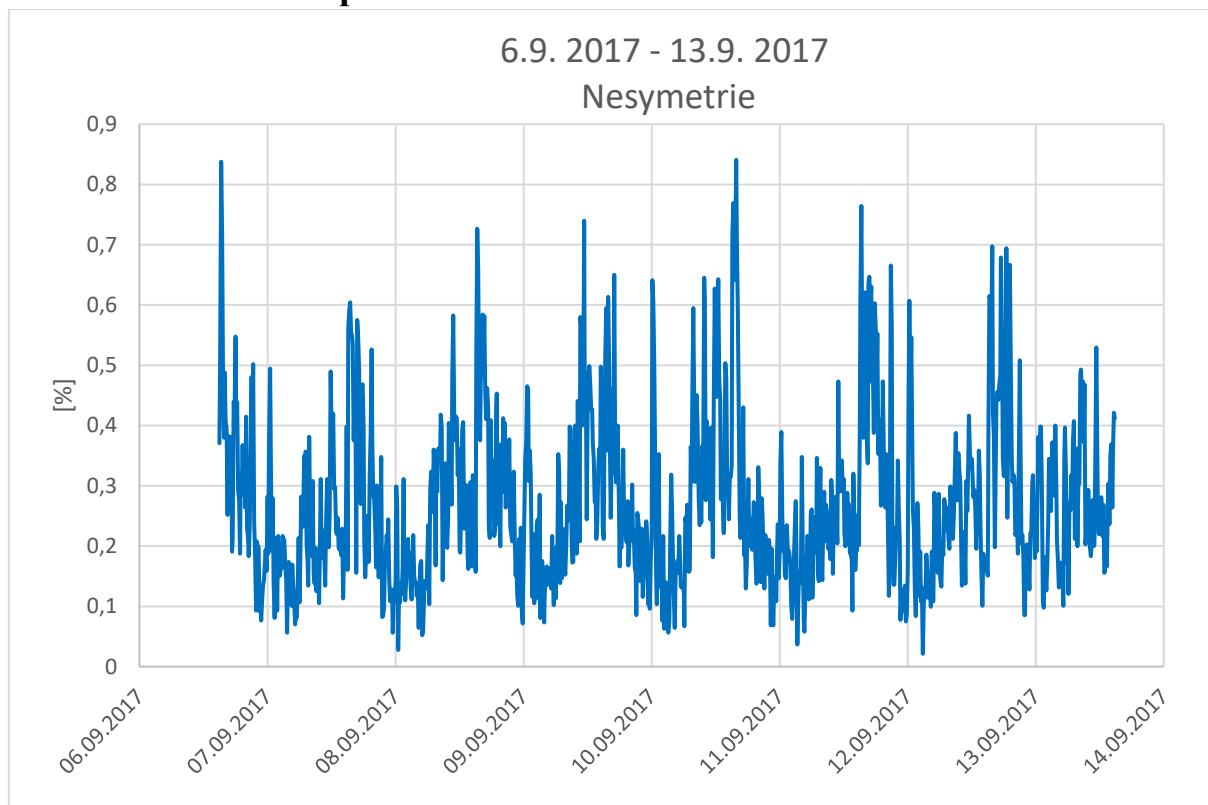
Obrázek 69 Místo 3 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie

4.3.2. Vyhodnocení

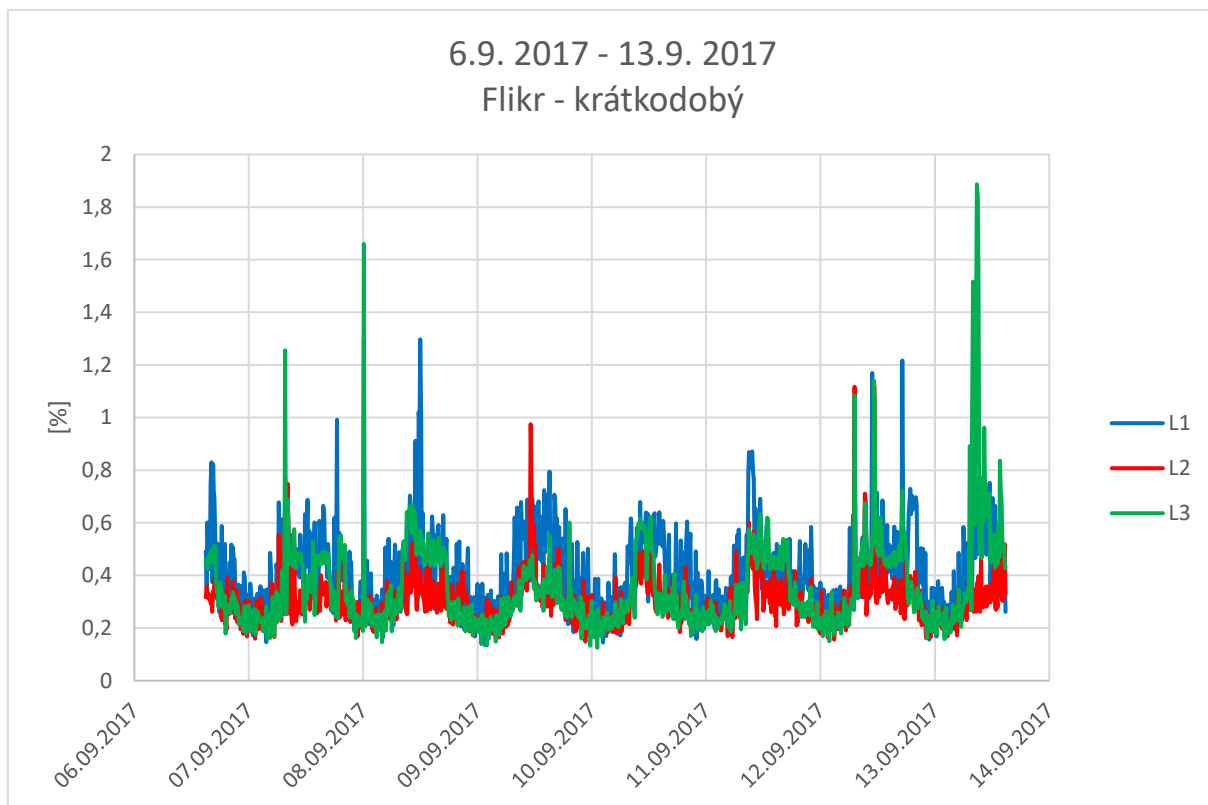
Třetí měření proběhlo v období 27.9.2017 – 4.10.2017. Průběh nesymetrie se v měřeném období pohyboval mezi hodnotami 0,1 až 0,7 %. Odchylení nesymetrie od běžných hodnot docházelo každý den, kdy největší hodnota nesymetrie byla naměřena dne 28.9. o velikosti 1,3 %. Průběh dlouhodobého flikru se během dnů měnil. Ráno se pohyboval okolo 0,3 % a během odpoledne vystoupal na hodnotu 0,7 %. Ke značnému vychýlení flikru došlo ve dnech 30.9., 1.10. a 2.10. Největší naměřený záznam byl právě 2.10. ve večerních hodinách a dosáhl hodnoty 3,5 % v fázi L2. Průběh THD U a harmonických do 15. řádu se od prvních dvou míst příliš nelišil. THD U se pohyboval od 1 % do 2,5 % a k většímu vychýlení průběhů během dnů nedošlo. Z průběhu THD U s 3. a 5. harmonické ze dne 28.9. vidíme, že v ranních hodinách nedocházelo tak k velkému zkreslení, jako během dne. Z grafů THD U a jednotlivých harmonických, měla nejvyšší podíl na zkreslení 5. a 7. harmonická složka. Ze souhrnného přehledu vidíme, že parametr nesymetrie a THD U jsou splněny, ale flikr opět překračuje limitní hodnoty pro fázi L2 a norma tedy není splněna.

4.4. Místo 4

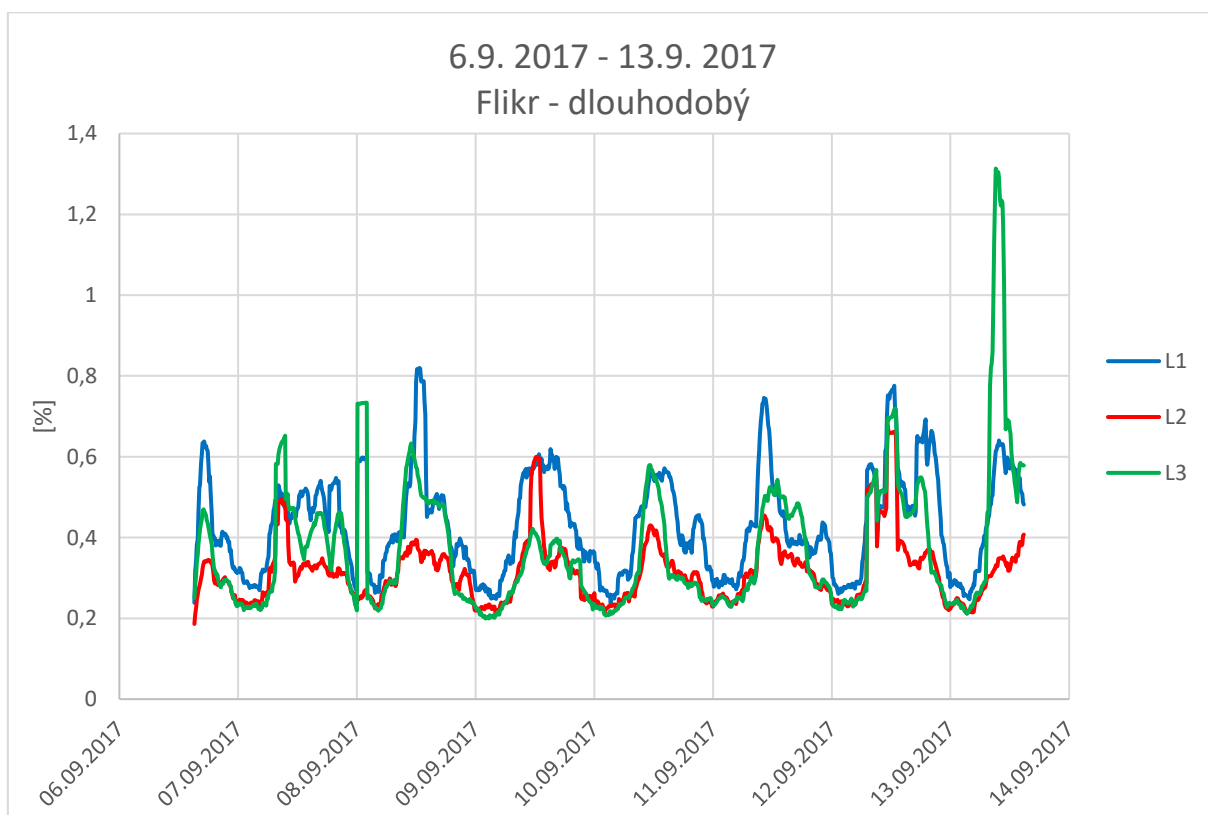
4.4.1. Grafické zpracování



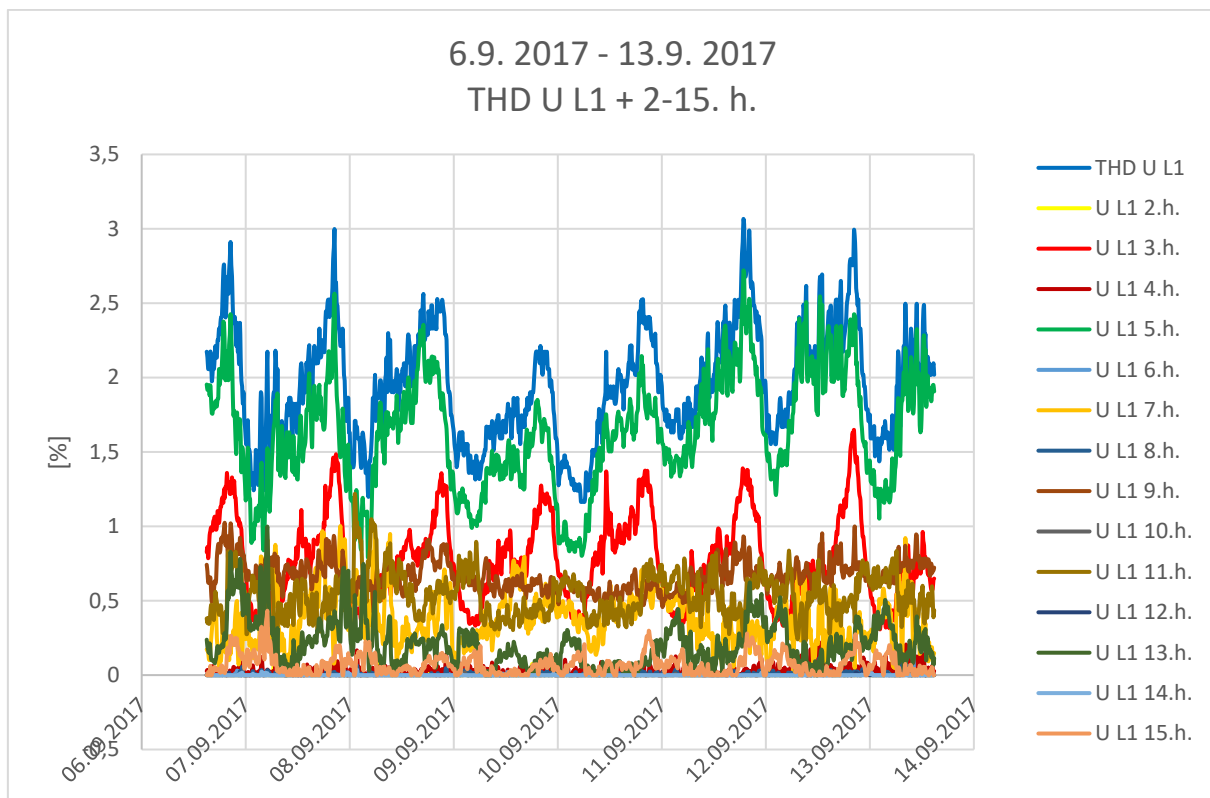
Obrázek 70 Místo 4 Průběh nesymetrie v časovém úseku 6.9.2017 – 13.9.2017



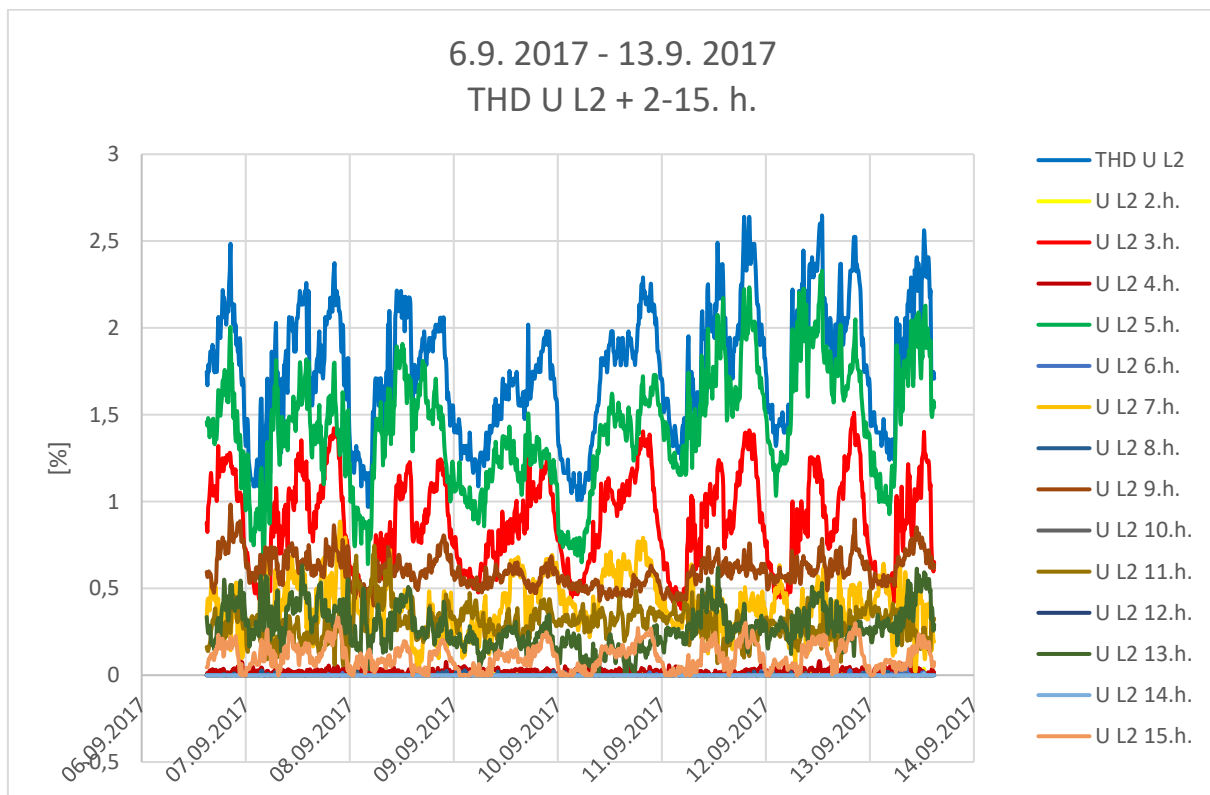
Obrázek 71 Místo 4 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 6.9.2017 – 13.9.2017



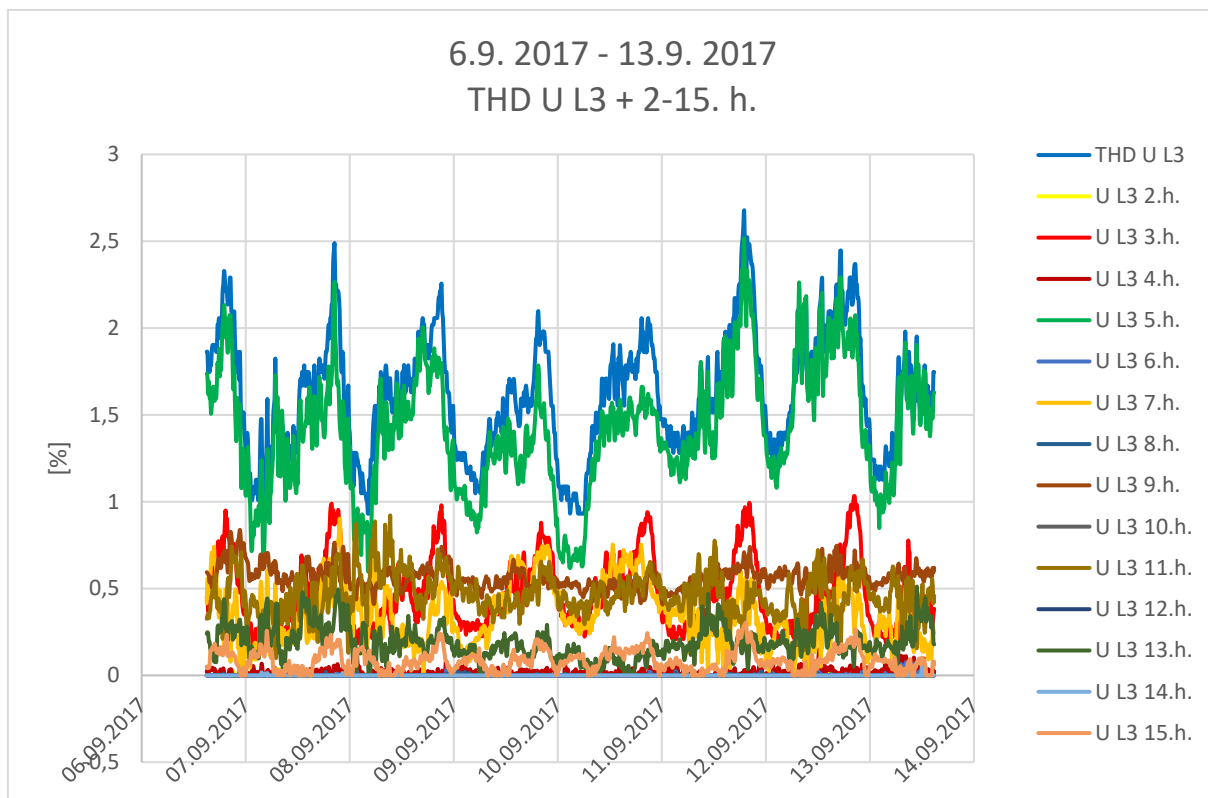
Obrázek 72 Místo 4 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 6.9.2017 – 13.9.2017



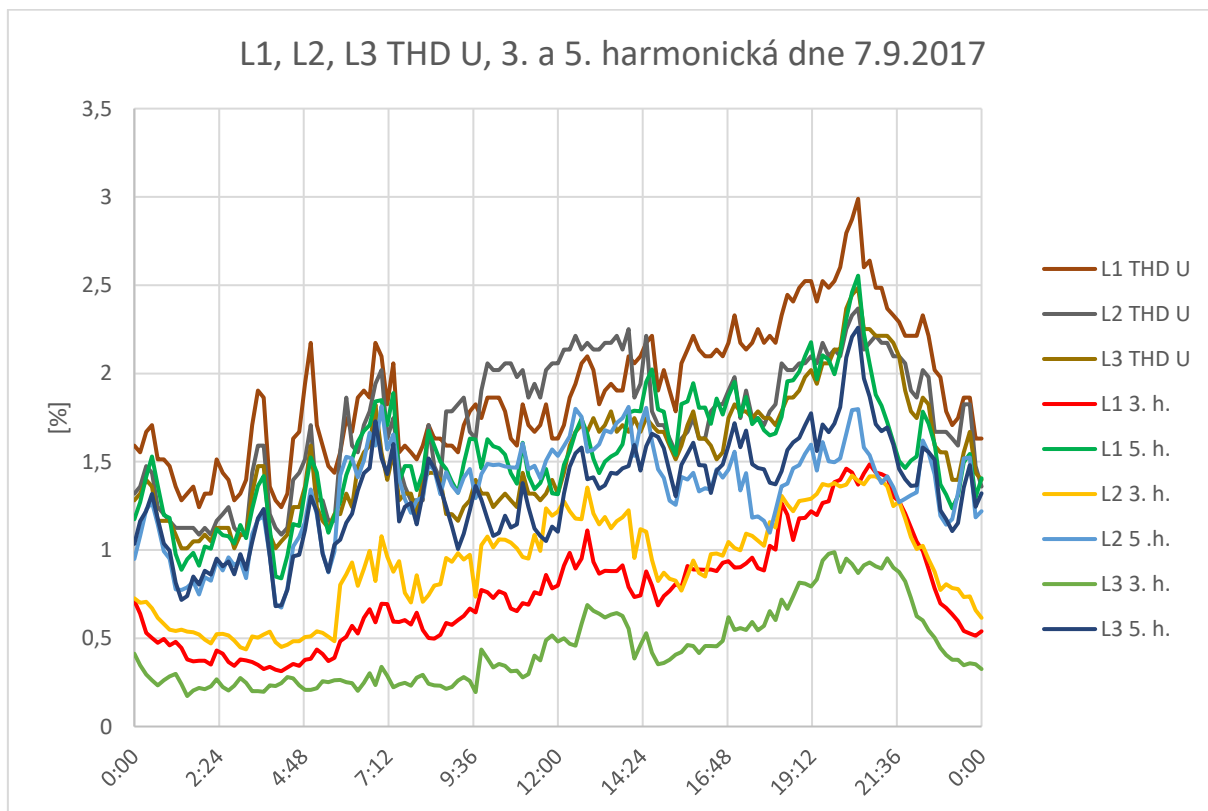
Obrázek 73 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L1 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017



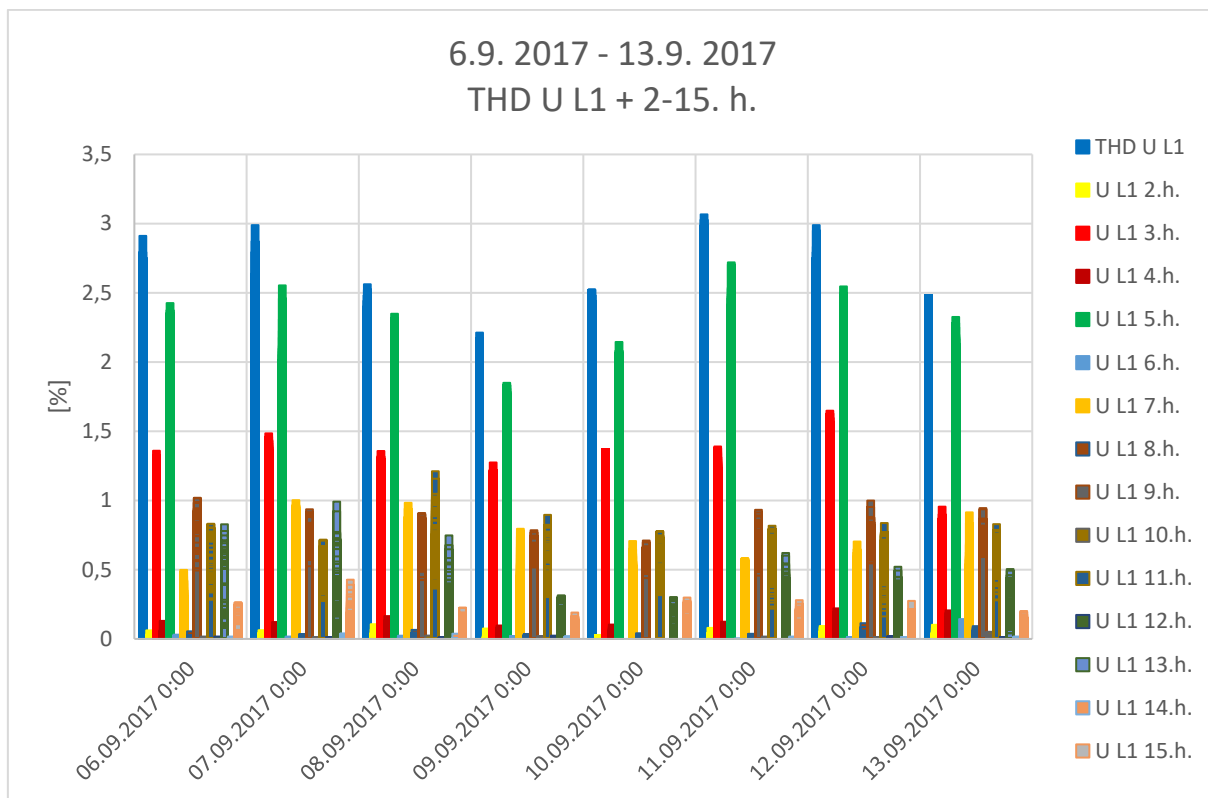
Obrázek 74 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L2 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017



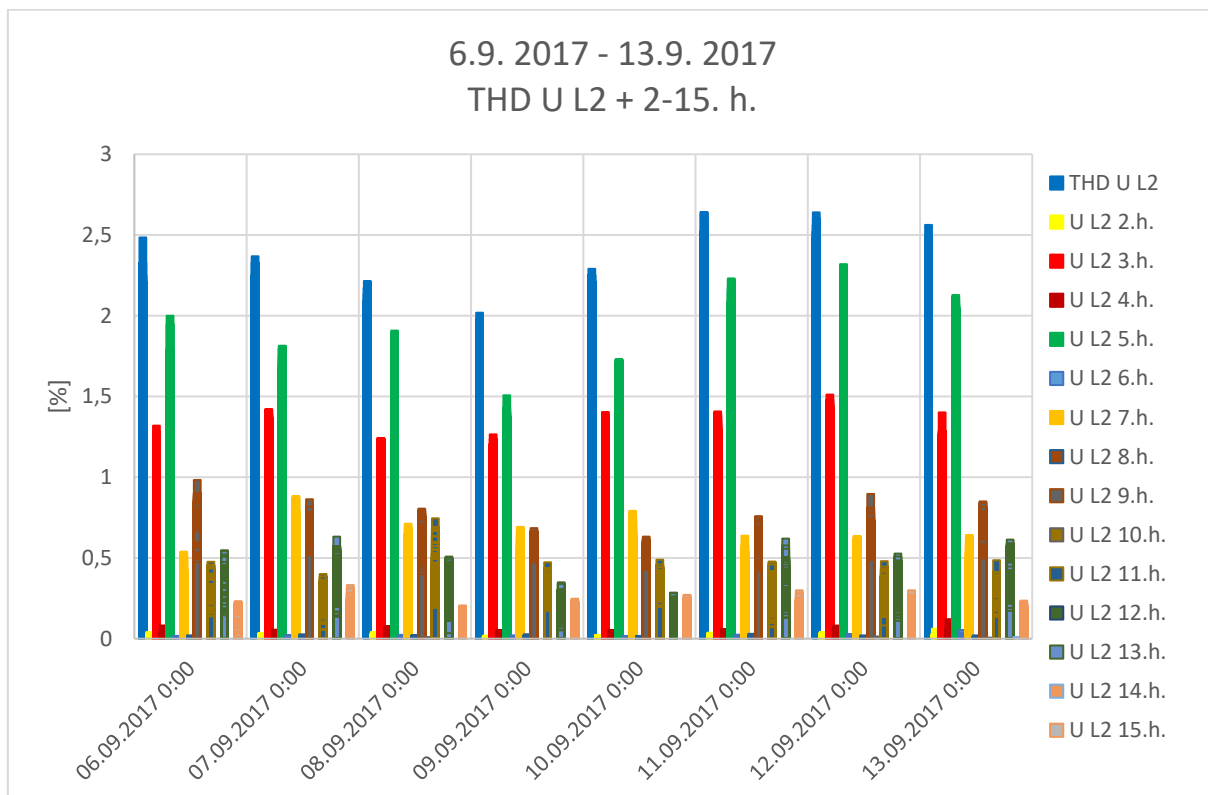
Obrázek 75 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L3 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017



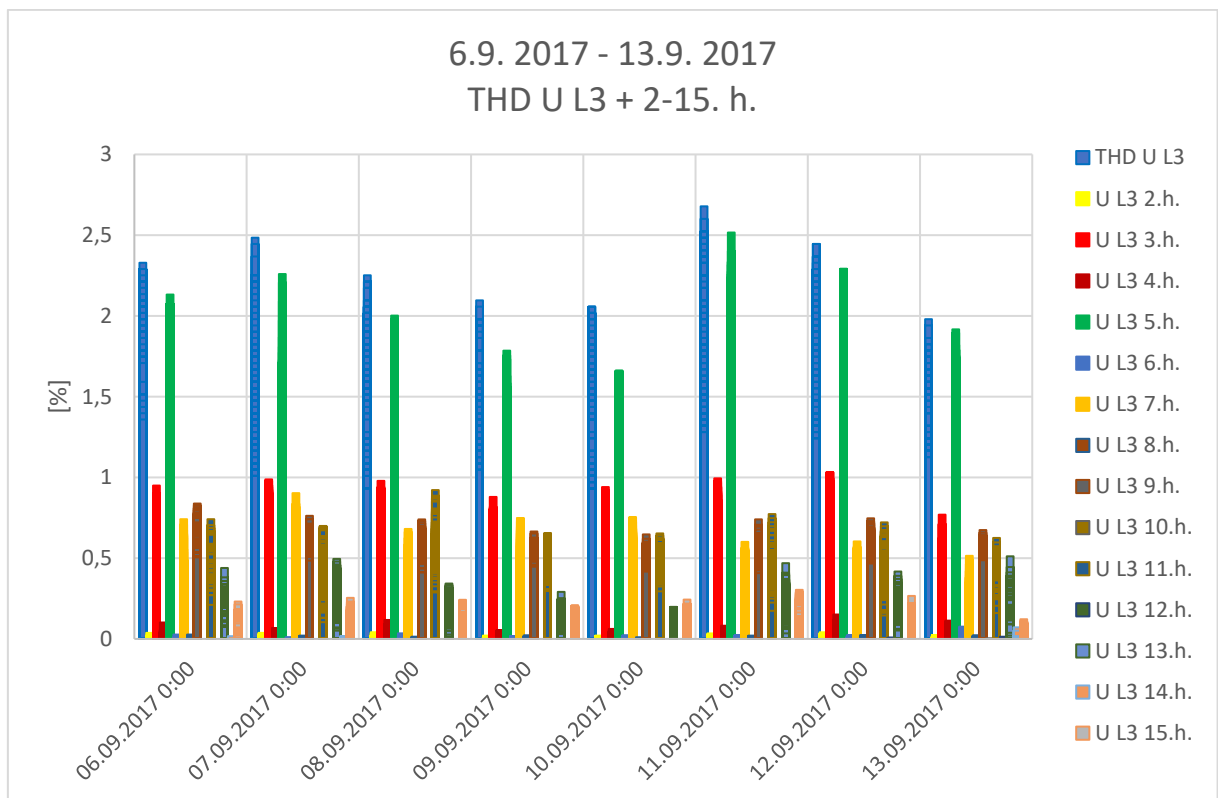
Obrázek 76 Místo 4 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 7.9.2017 pro fázi L1, L2, L3



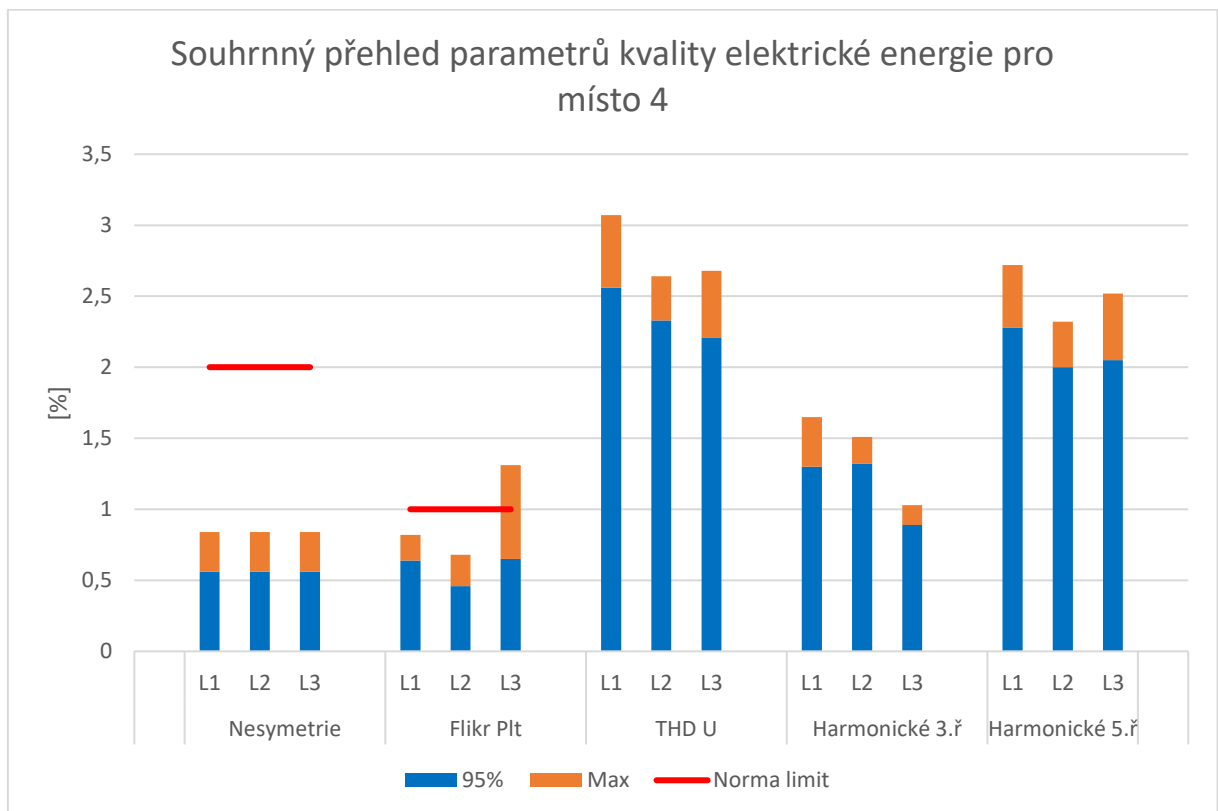
Obrázek 77 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017



Obrázek 78 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017



Obrázek 79 Místo 4 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 6.9.2017 – 13.9.2017



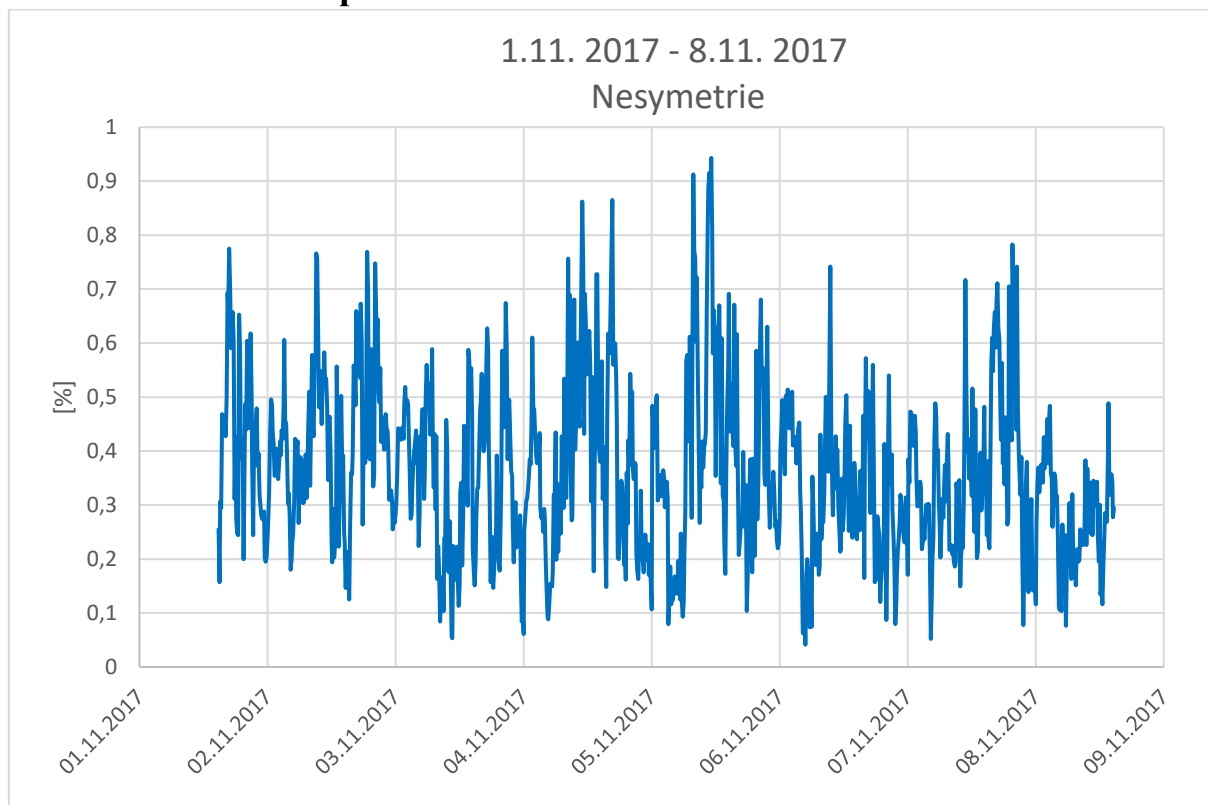
Obrázek 80 Místo 4 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie

4.4.2. Vyhodnocení

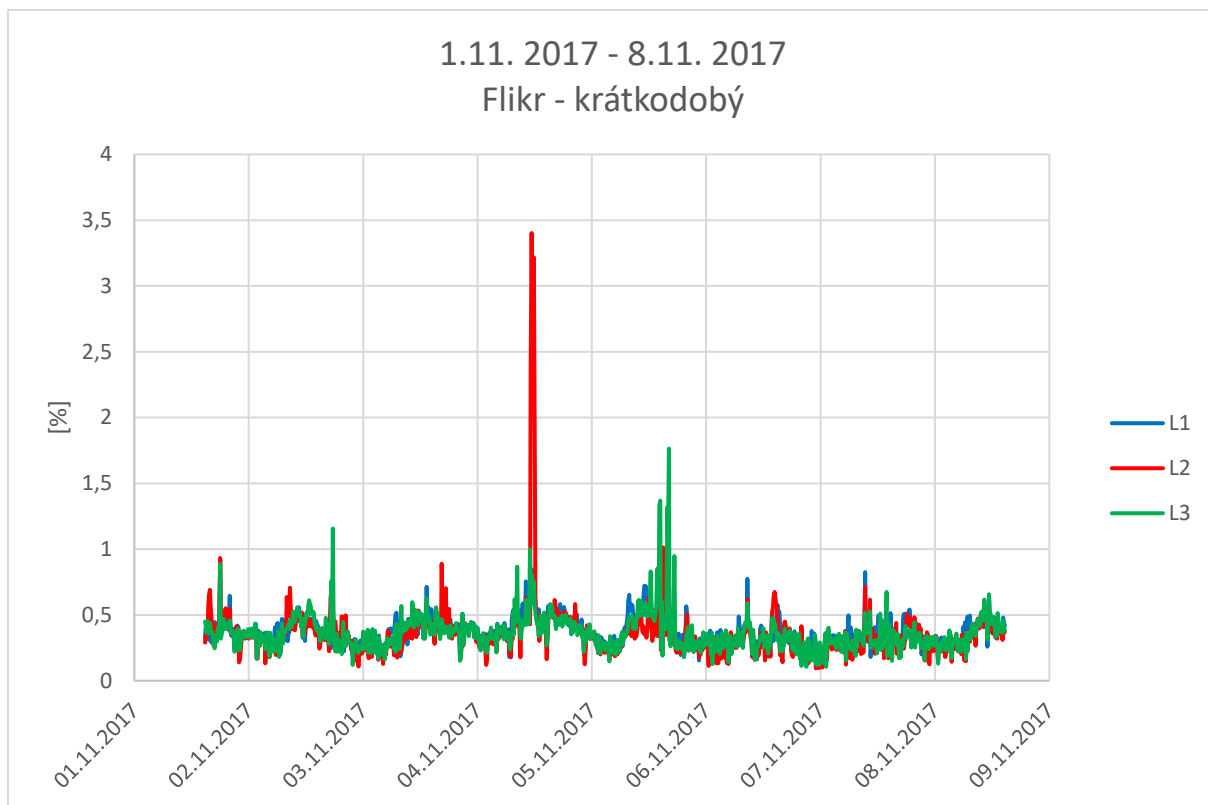
Čtvrté měření probíhalo v období mezi 6.9.2017 – 13.9.2017. Z grafu nesymetrie jsou patrné občasné výkyvy během dne, kdy největší z nich nastal 10.9. o velikosti 0,85 % během odpoledních hodin. Jinak se nesymetrie pohybovala v mezích 0,1 až 0,6 %. Průběh dlouhodobého flikru se během měřeného období příliš neměnil a kmital v mezích 0,2 – 0,7 %. Největší nárůst flikru byl zaznamenán dne 13.9 o velikosti 1,3 % ve fázi L3. THD U se oproti předešlým měřením příliš nelišilo a opět se pohybovalo v rozmezí 1 – 2,5 %. Průběhy THD U s 3. a 5. harmonickou složkou byly přesněji zobrazeny pro den 7.9., kdy v ranních hodinách bylo zkreslení nejmenší, postupně se během dne zvyšovalo a navečer dosáhlo svého maxima. Další grafy představují celkové zkreslení a největší naměřené velikosti jednotlivých harmonických. Největší podíl na celkovém zkreslení měla 3. a 5. harmonická složka. Ze souhrnného přehledu parametrů vidíme, že v tomto místě nejsou překročeny limitní hodnoty a parametry normě vyhovují.

4.5. Místo 5

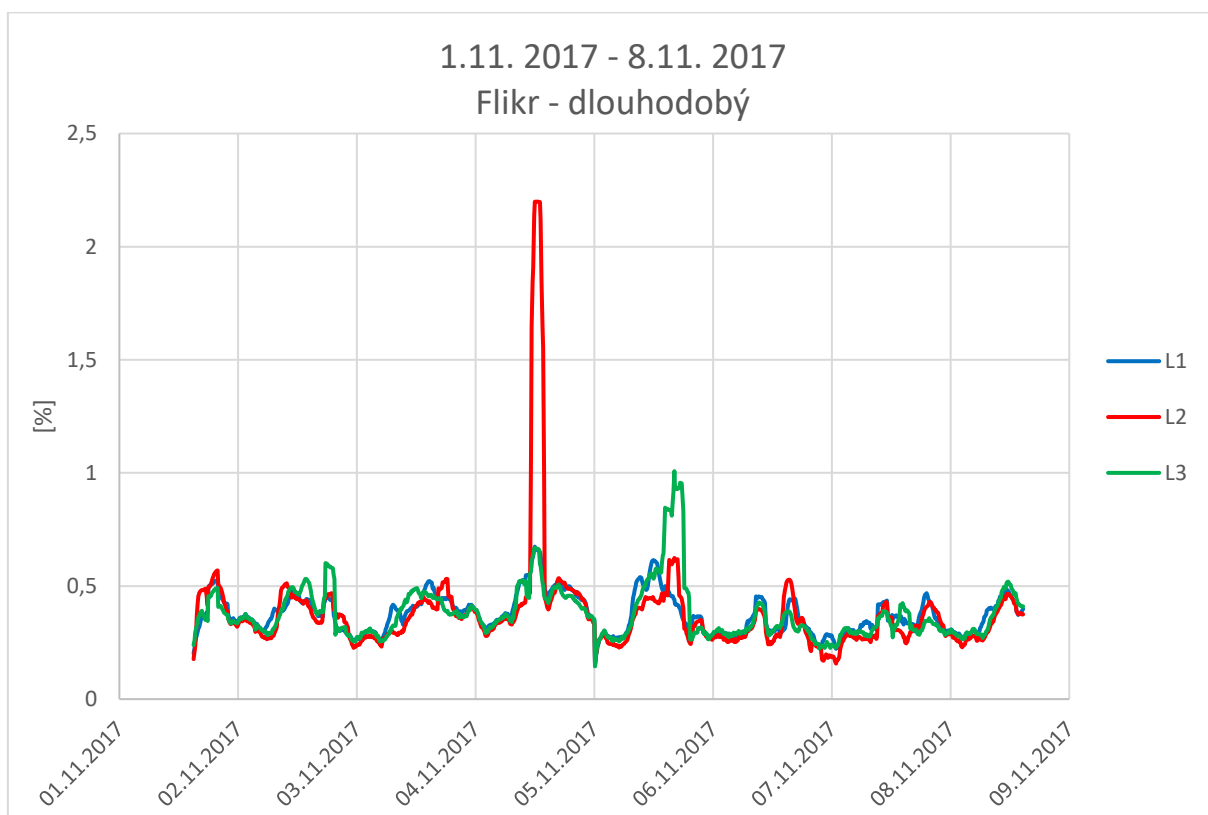
4.5.1. Grafické zpracování



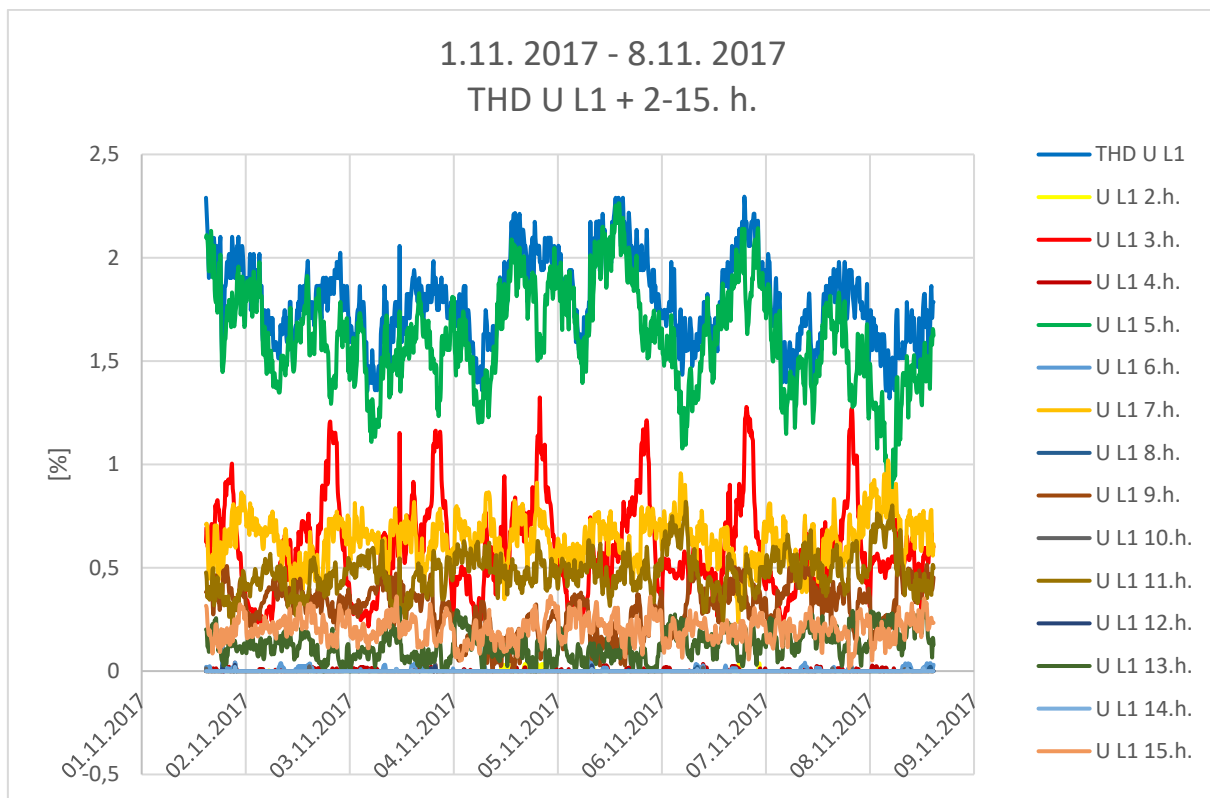
Obrázek 81 Místo 5 Průběh nesymetrie v časovém úseku 1.11.2017 – 8.11.2017



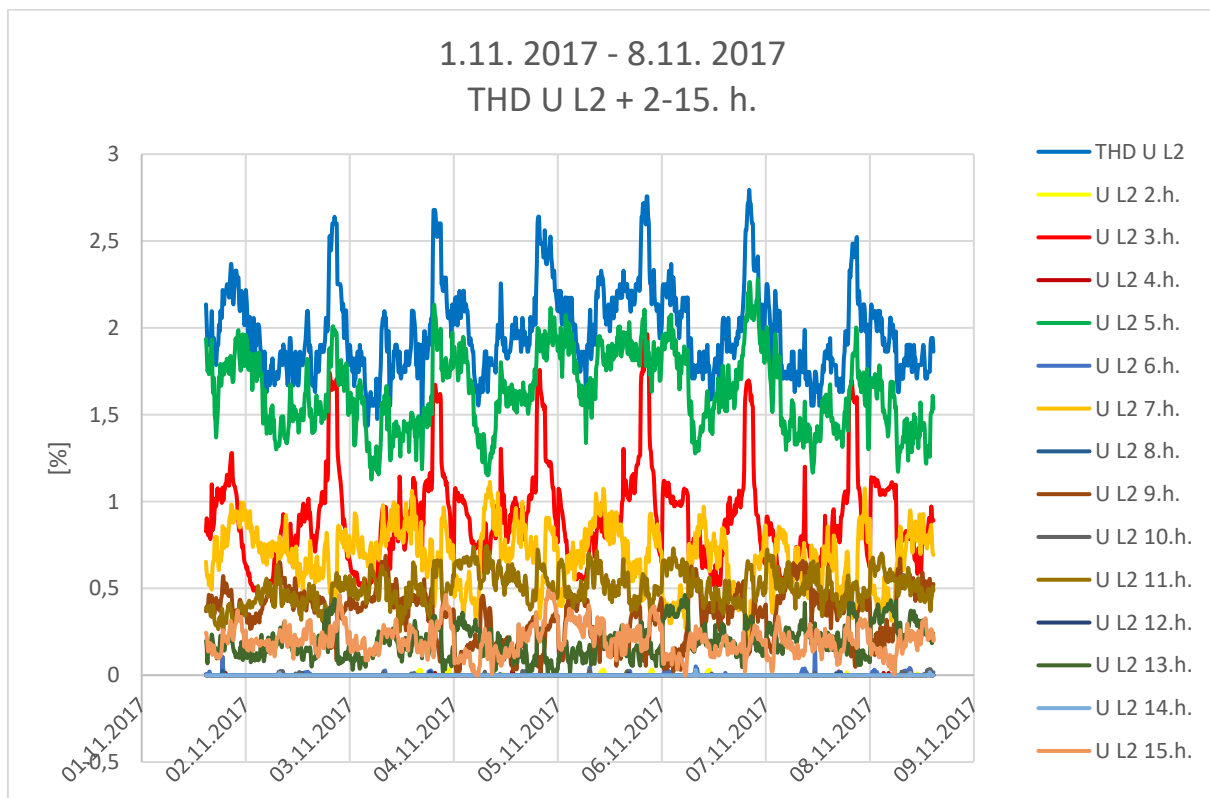
Obrázek 82 Místo 5 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 1.11.2017 – 8.11.2017



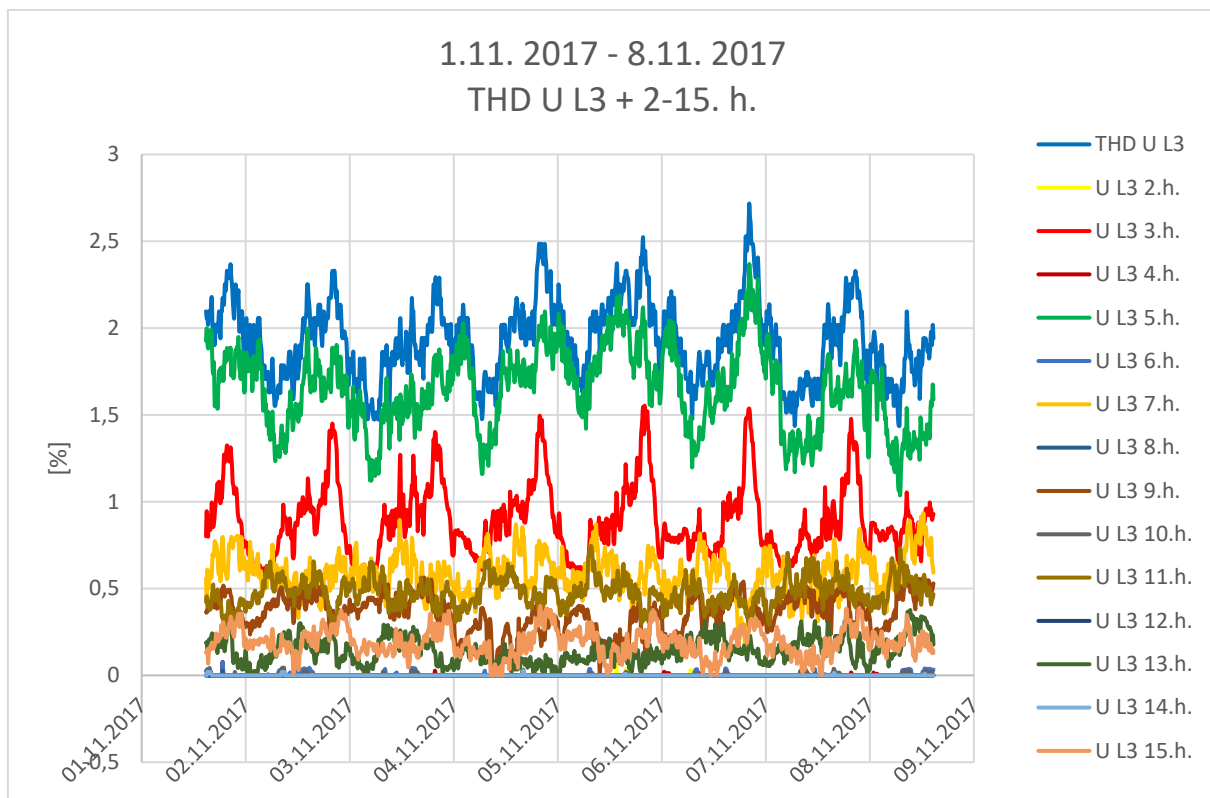
Obrázek 83 Místo 5 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 1.11.2017 – 8.11.2017



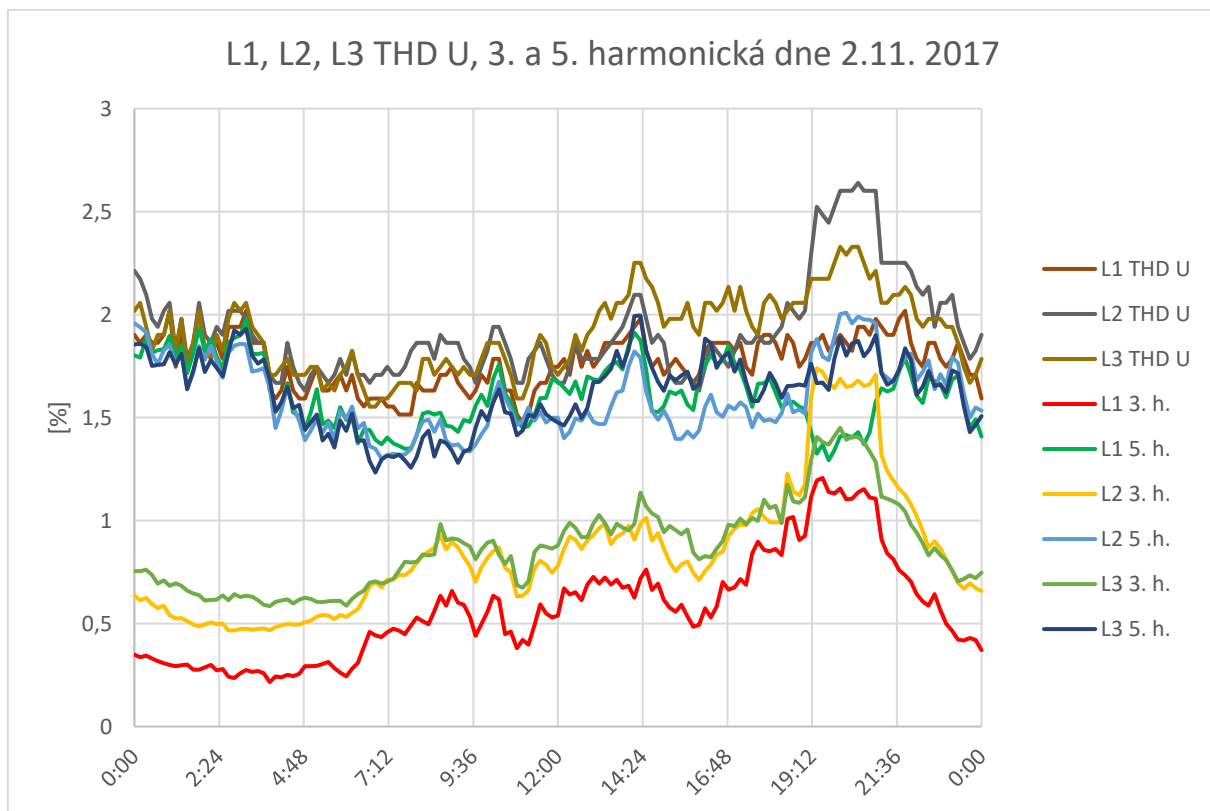
Obrázek 84 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L1 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017



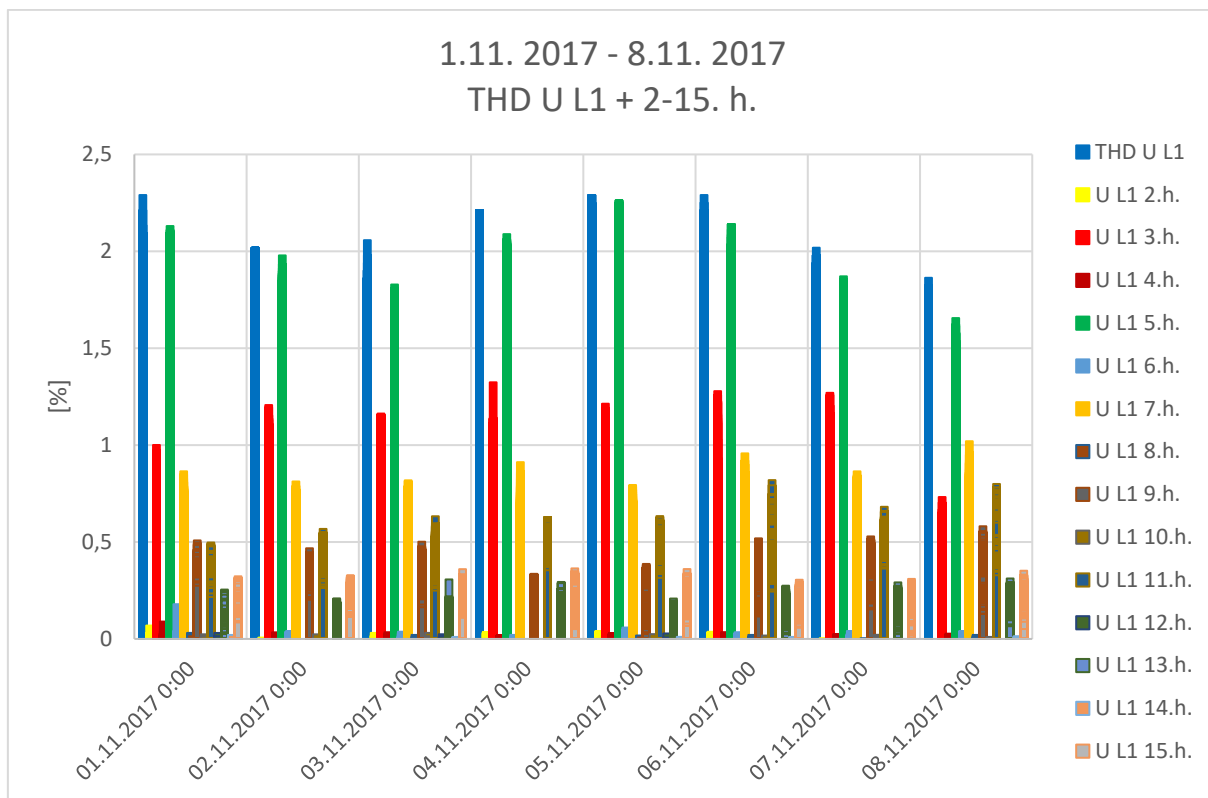
Obrázek 85 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L2 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017



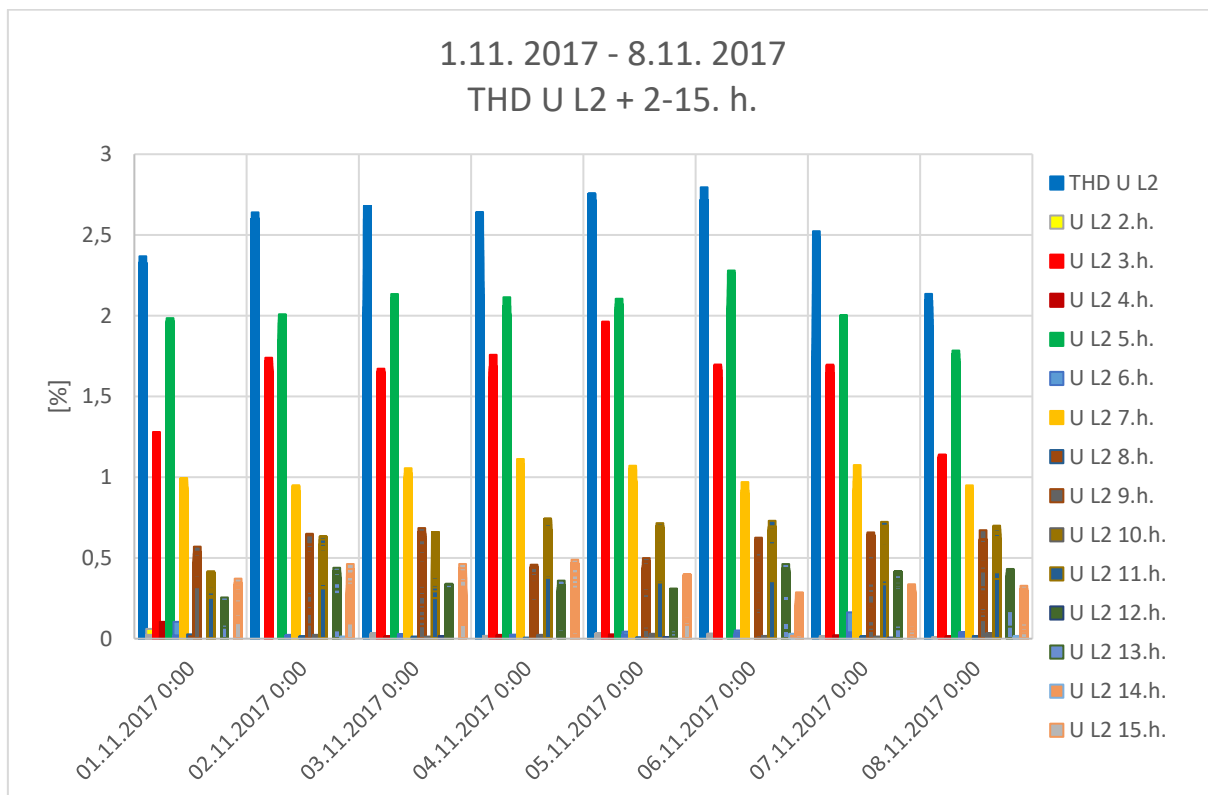
Obrázek 86 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L3 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017



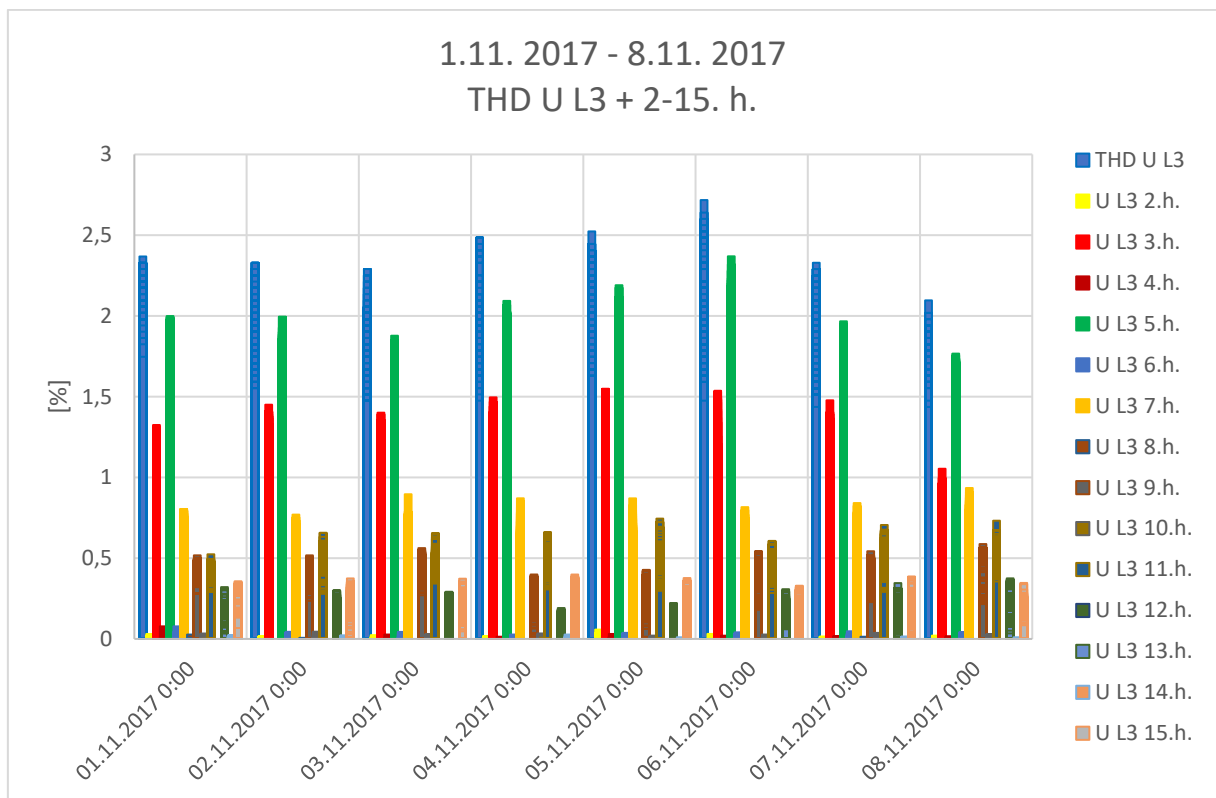
Obrázek 87 Místo 5 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 2.11.2017 pro fázi L1, L2, L3



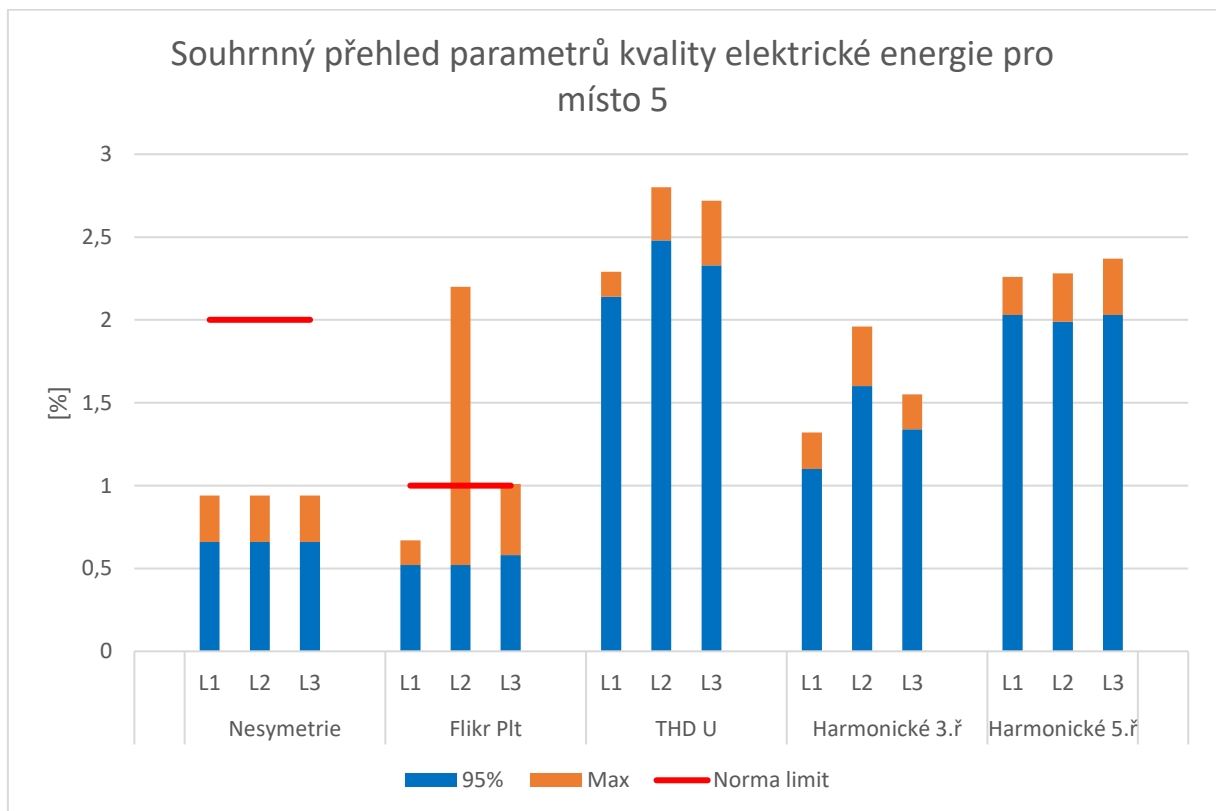
Obrázek 88 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017



Obrázek 89 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017



Obrázek 90 Místo 5 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 1.11.2017 – 8.11.2017



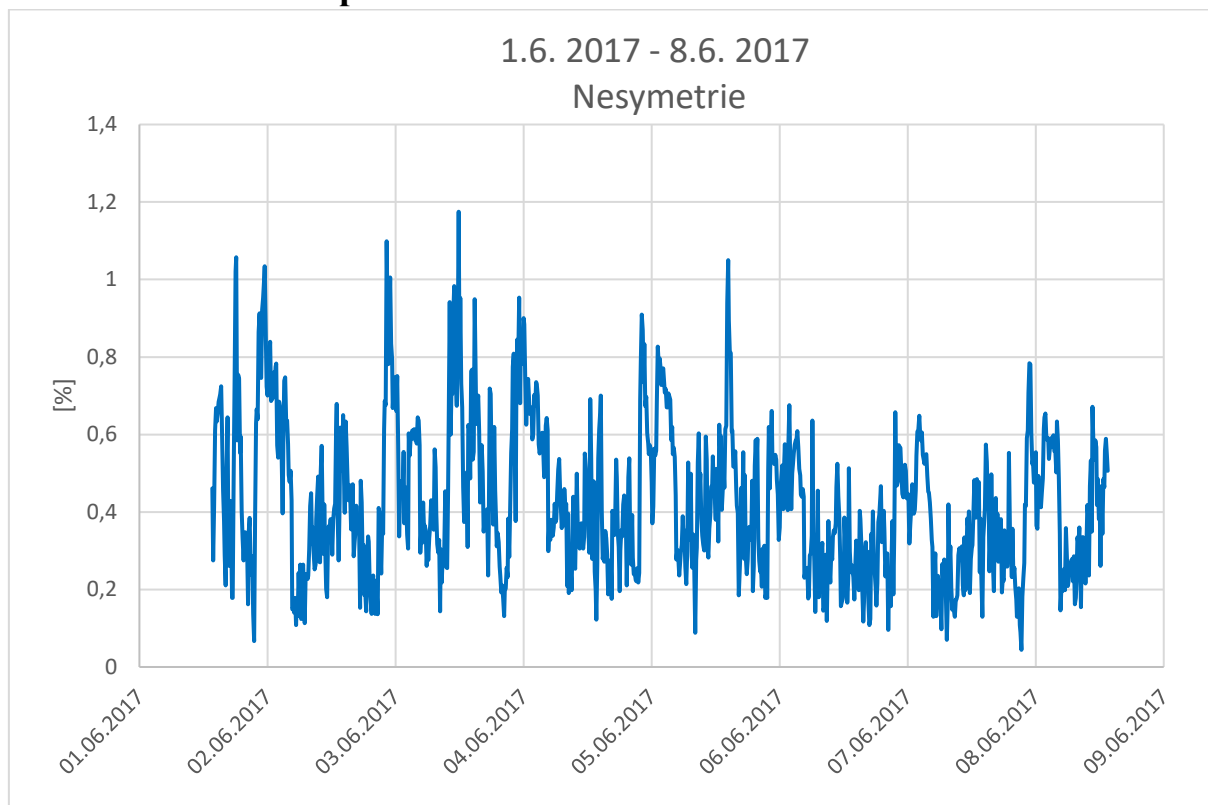
Obrázek 91 Místo 5 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie

4.5.2. Vyhodnocení

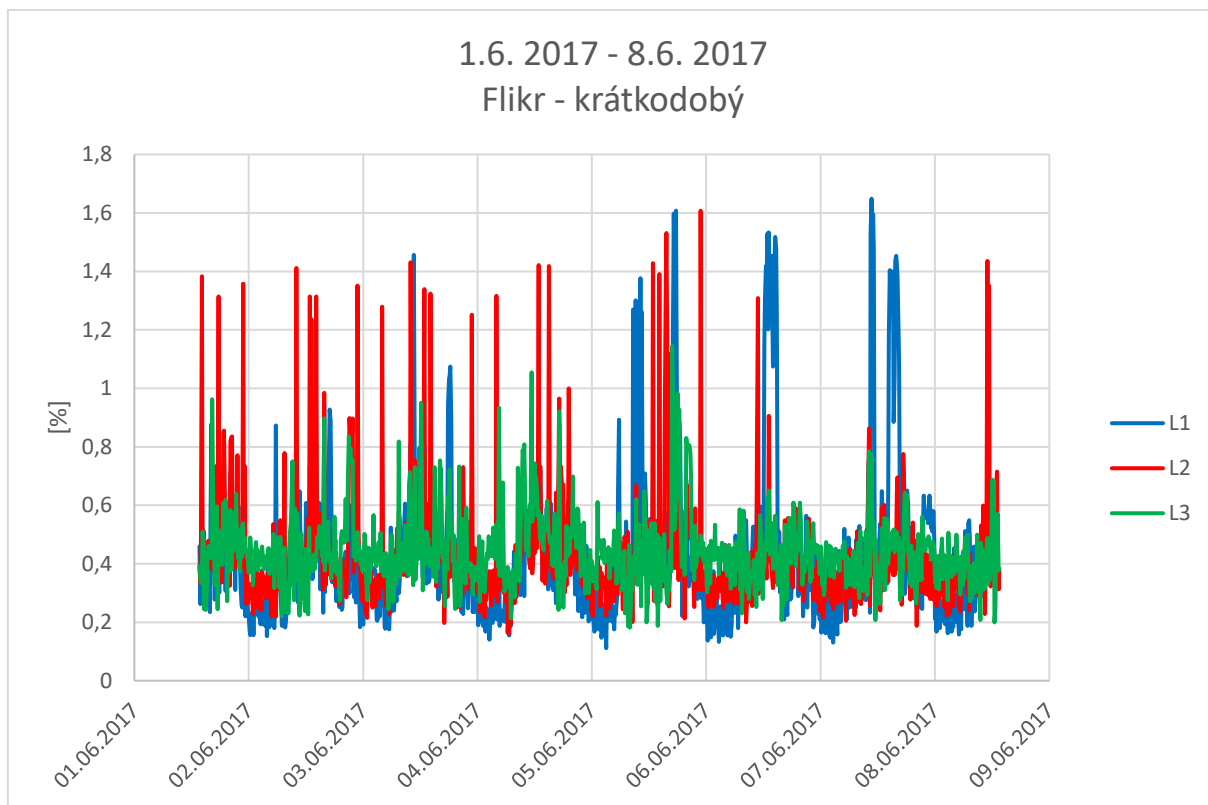
Páté měření proběhlo ve dnech 1.11.2017 – 8.11.2017. Nesymetrie v měřeném období opět dosahovala hodnot v rozmezí 0,1 až 0,7 % a k nejvyššímu výkyvu došlo ve dne 5.11. v odpoledních hodinách, a to na hodnotu 0,94 %. Průběh flikru se většinou během měření pohyboval okolo 0,24 – 0,65 %, kdy ale k největšímu odchýlení na hodnotu 2,2 % došlo dne 4.11. v odpoledních hodinách, a to ve fázi L2. Průběhy THD U pulzovaly v rozsahu 1,5 – 2,5 %. Z grafu THD U, 3. a 5. harmonické pro den 7.9. vidíme zkreslení, které bylo během ranních hodin nejmenší, zatímco během dne se postupně zvyšovalo a ve večerních hodinách dosahovalo svého denního maxima. Další grafy znázorňují maximální velikosti jednotlivých harmonických v průběhu měřeného období a jejich podíl na celkovém zkreslení. Největší vliv na celkové harmonické zkreslení měla 3. a 5. harmonická složka. Ze souhrnného přehledu parametrů je zřejmé, že pro tohle měřené období parametry nepřekračují limitní hodnoty a vyhovují normě.

4.6. Místo 6

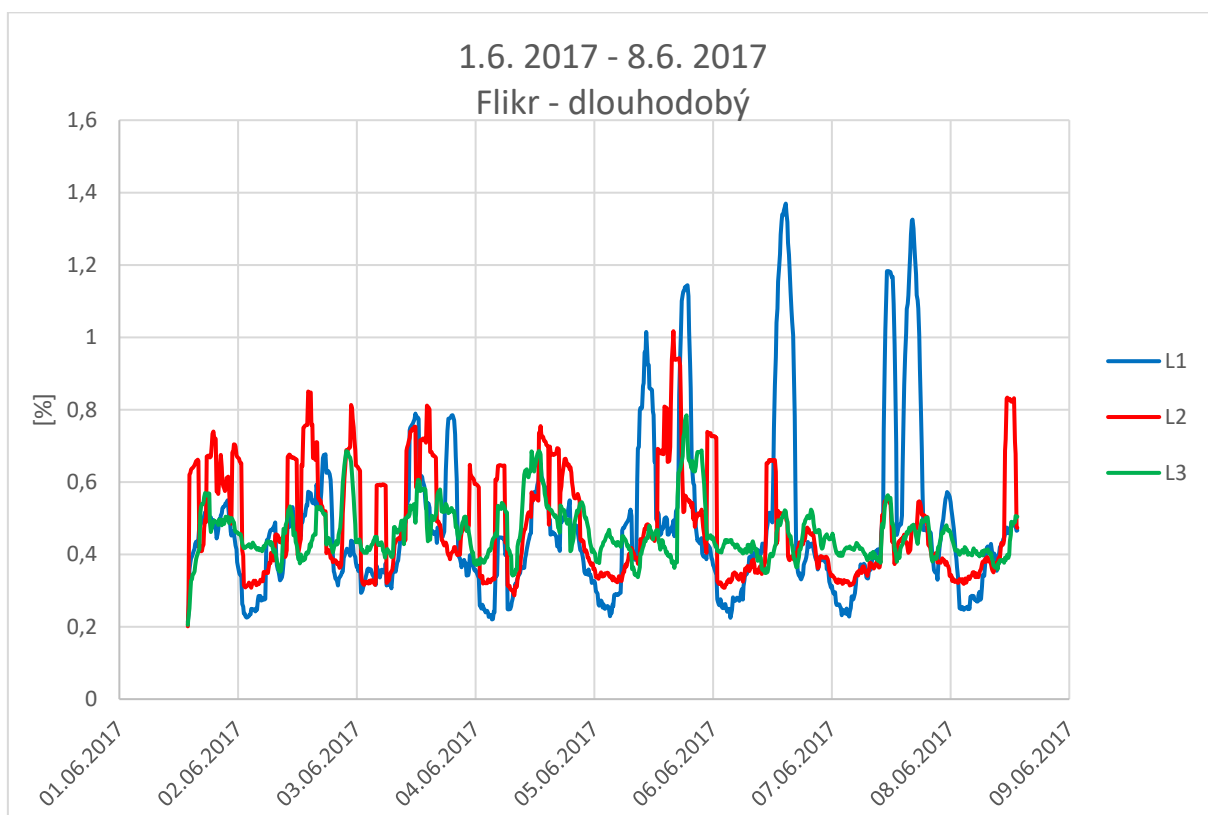
4.6.1. Grafické zpracování



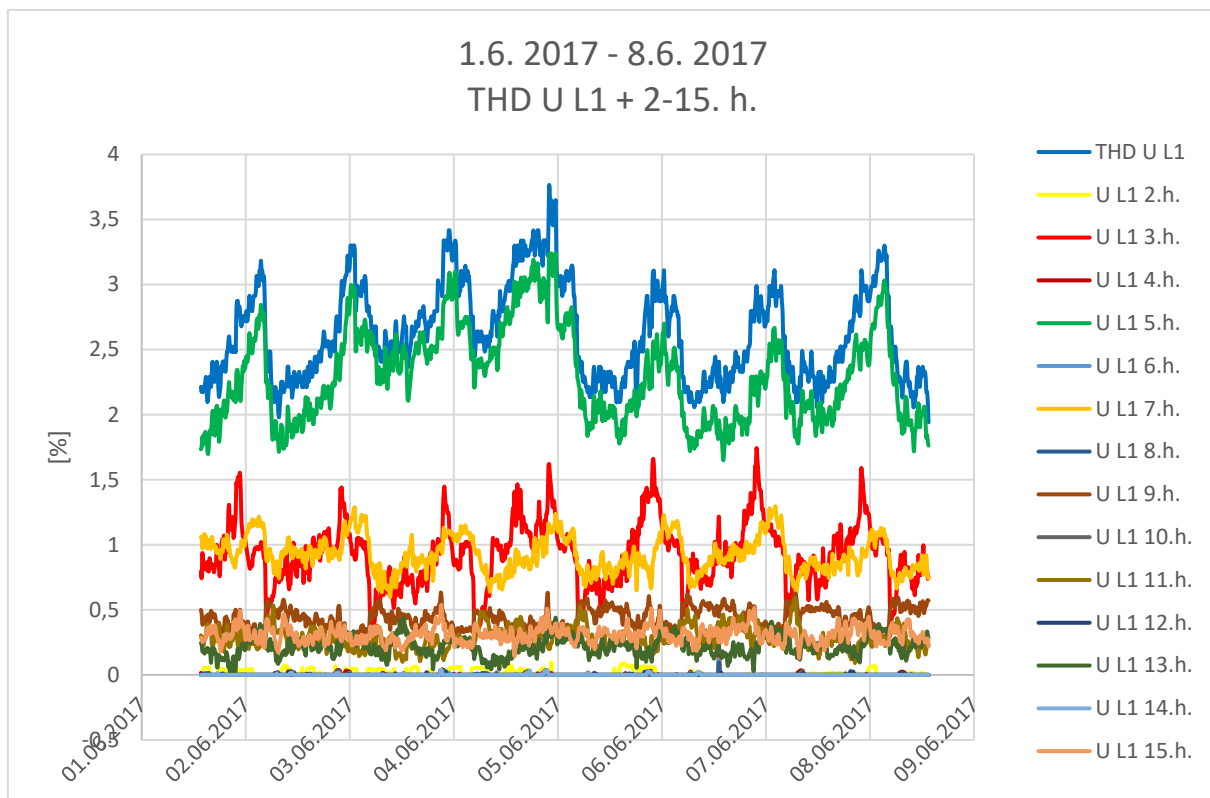
Obrázek 92 Místo 6 Průběh nesymetrie v časovém úseku 1.6.2017 – 8.6.2017



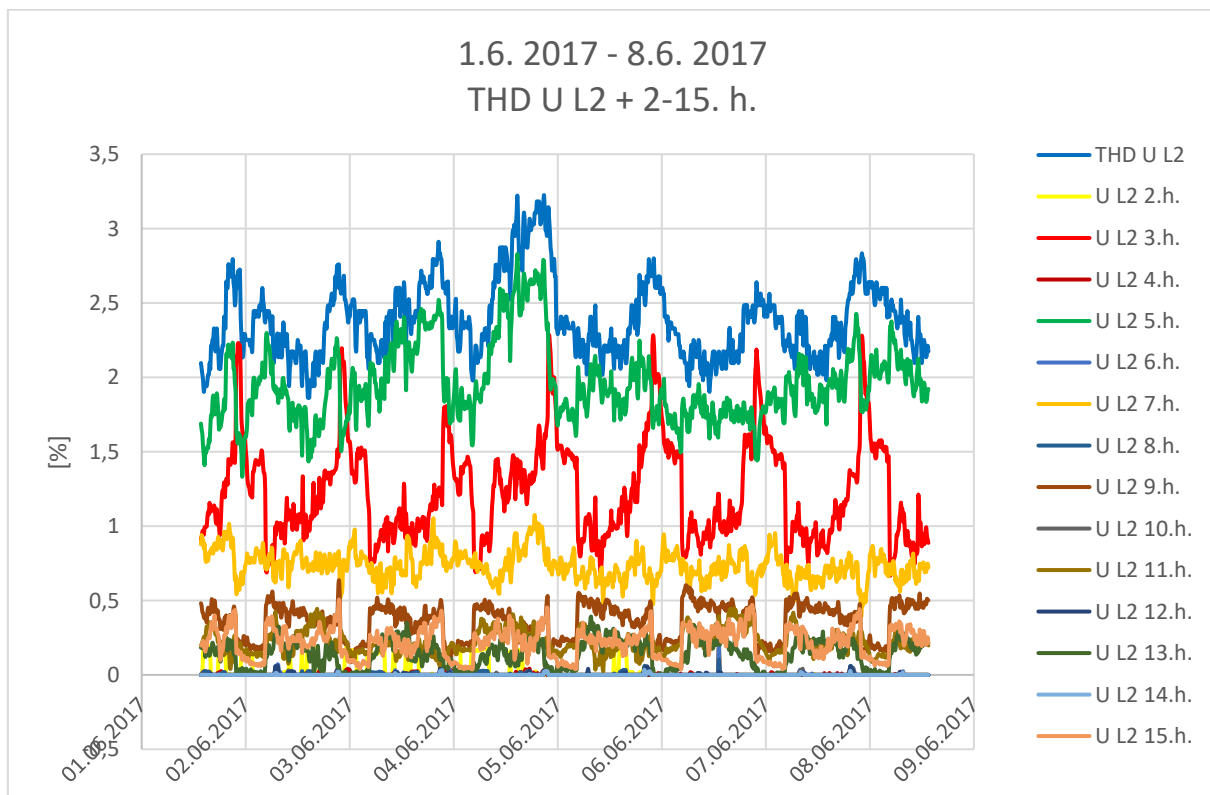
Obrázek 93 Místo 6 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 1.6.2017 – 8.6.2017



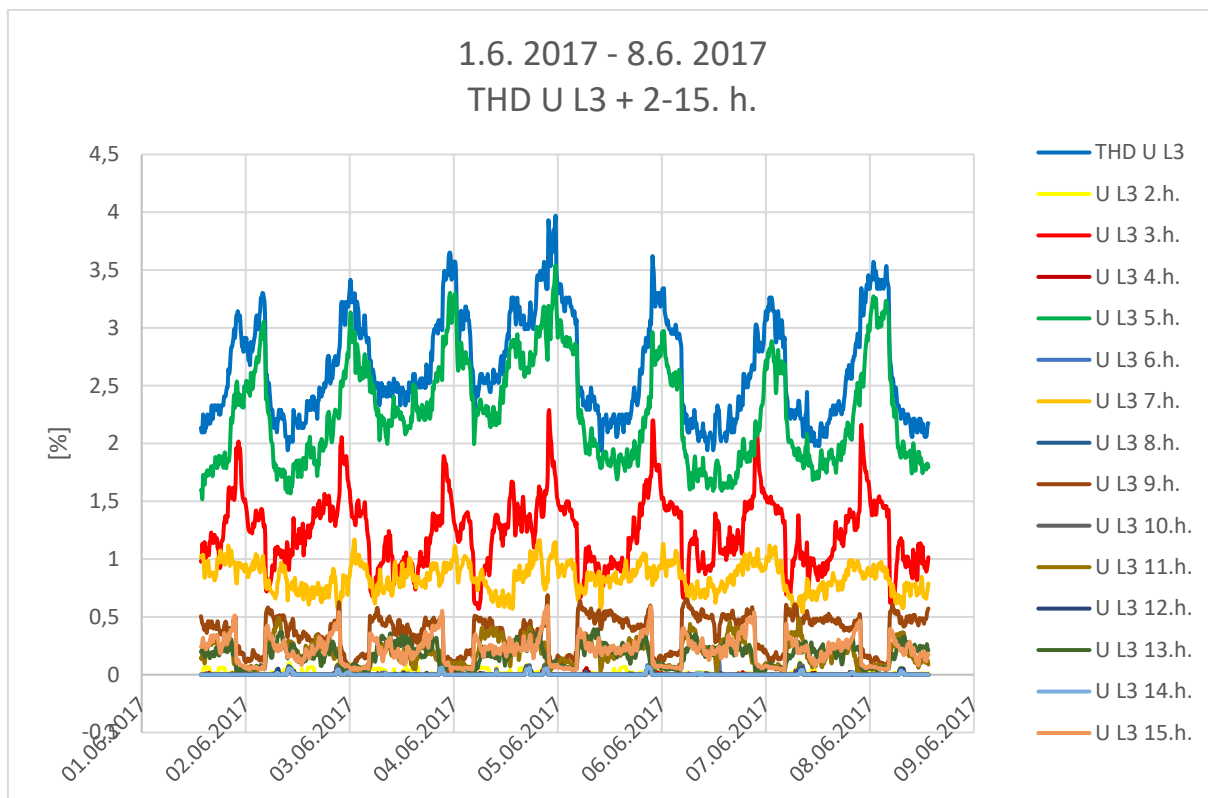
Obrázek 94 Místo 6 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 1.6.2017 – 8.6.2017



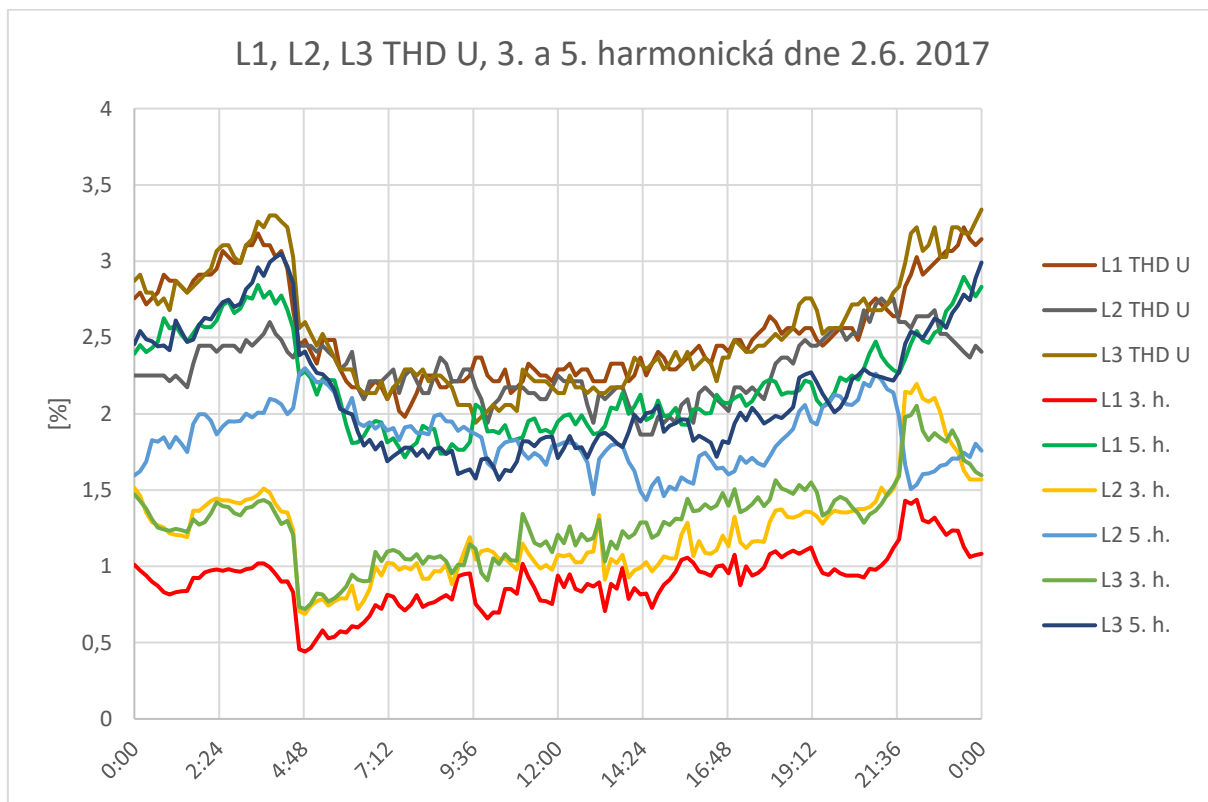
Obrázek 95 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L1 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017



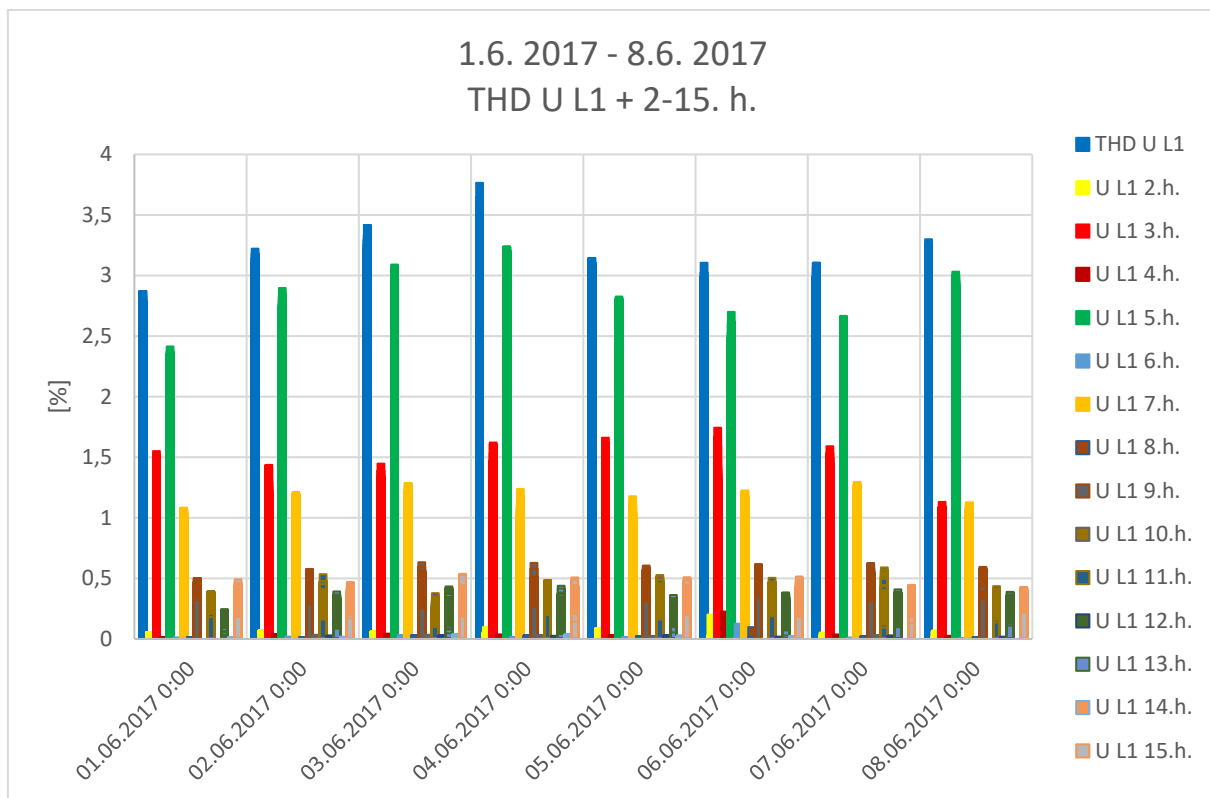
Obrázek 96 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L2 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017



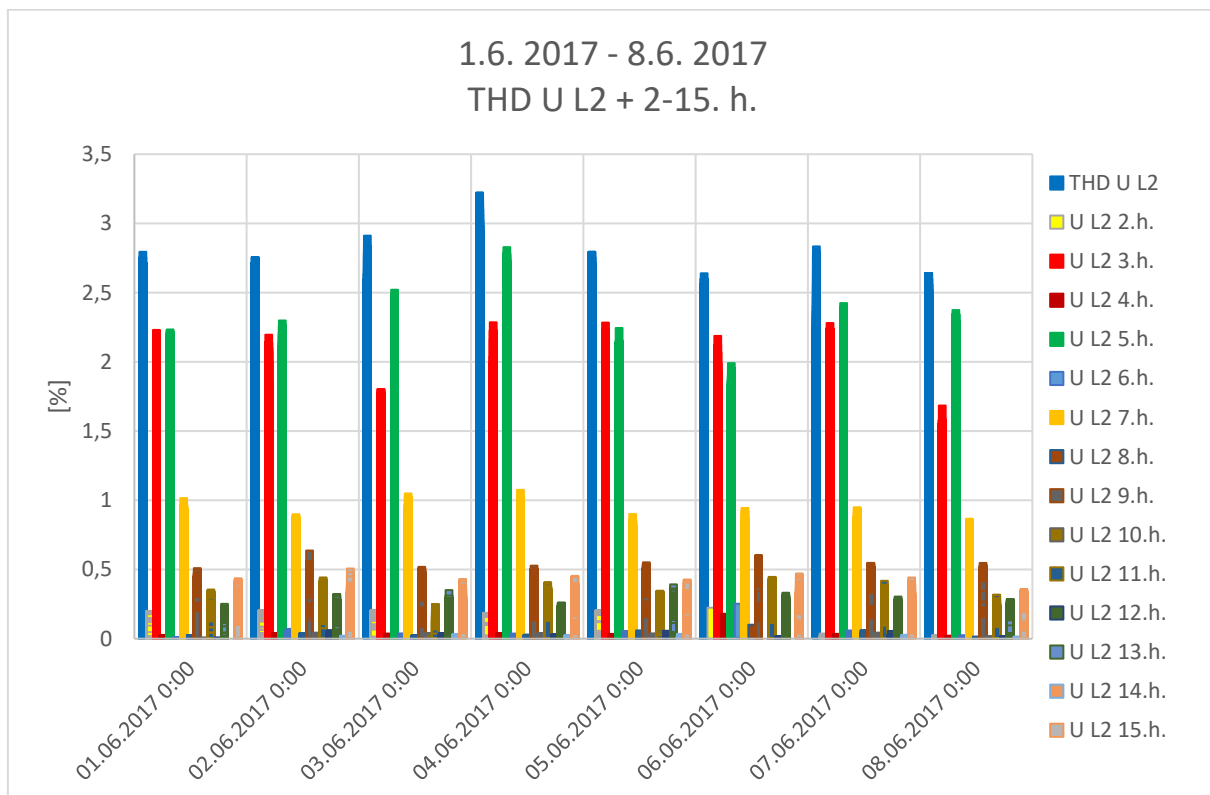
Obrázek 97 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L3 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017



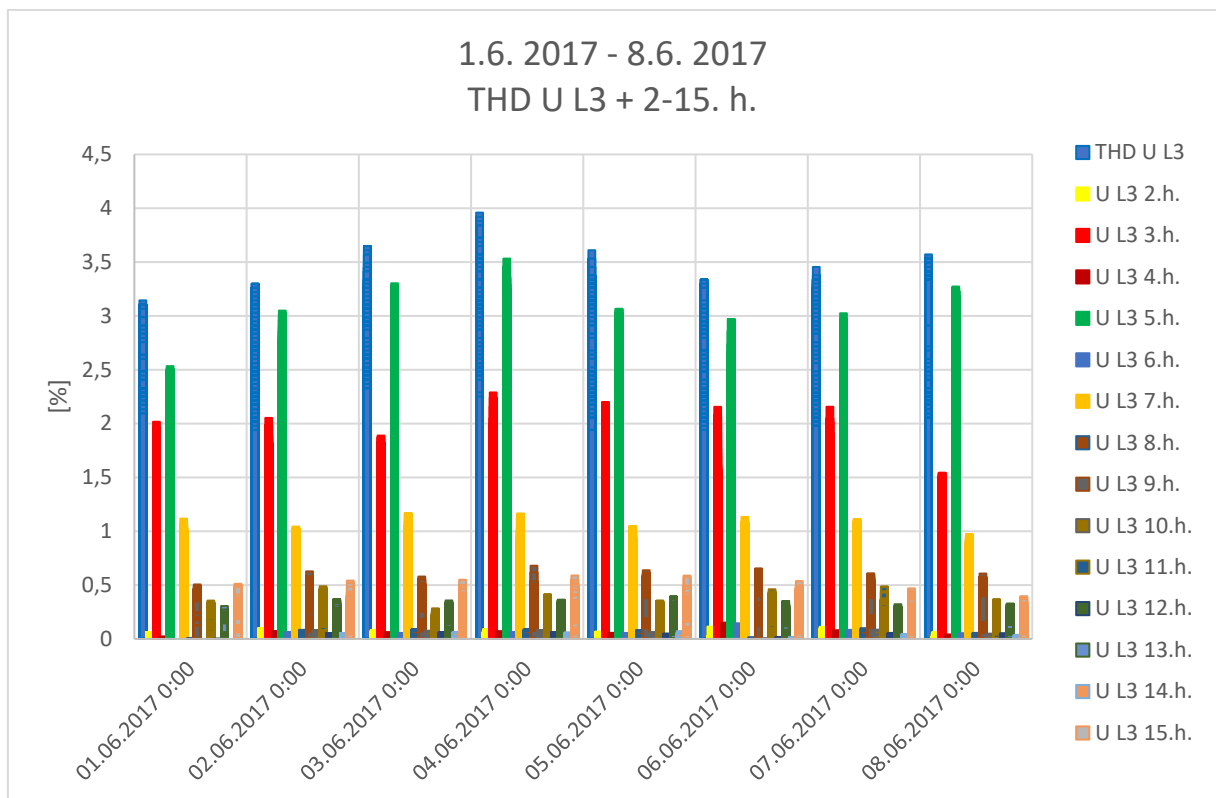
Obrázek 98 Místo 6 Průběh celkového harmonické zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 2.6.2017 pro fázi L1, L2, L3



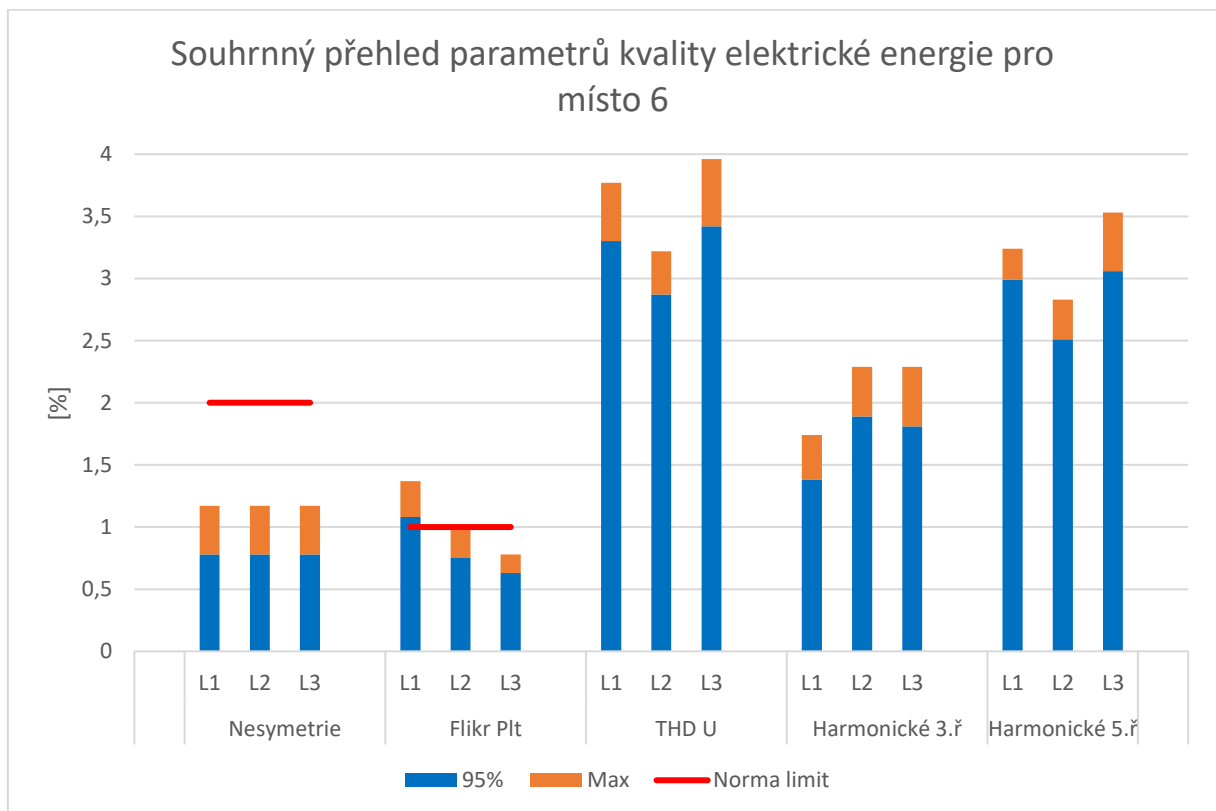
Obrázek 99 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017



Obrázek 100 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017



Obrázek 101 Místo 6 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 1.6.2017 – 8.6.2017



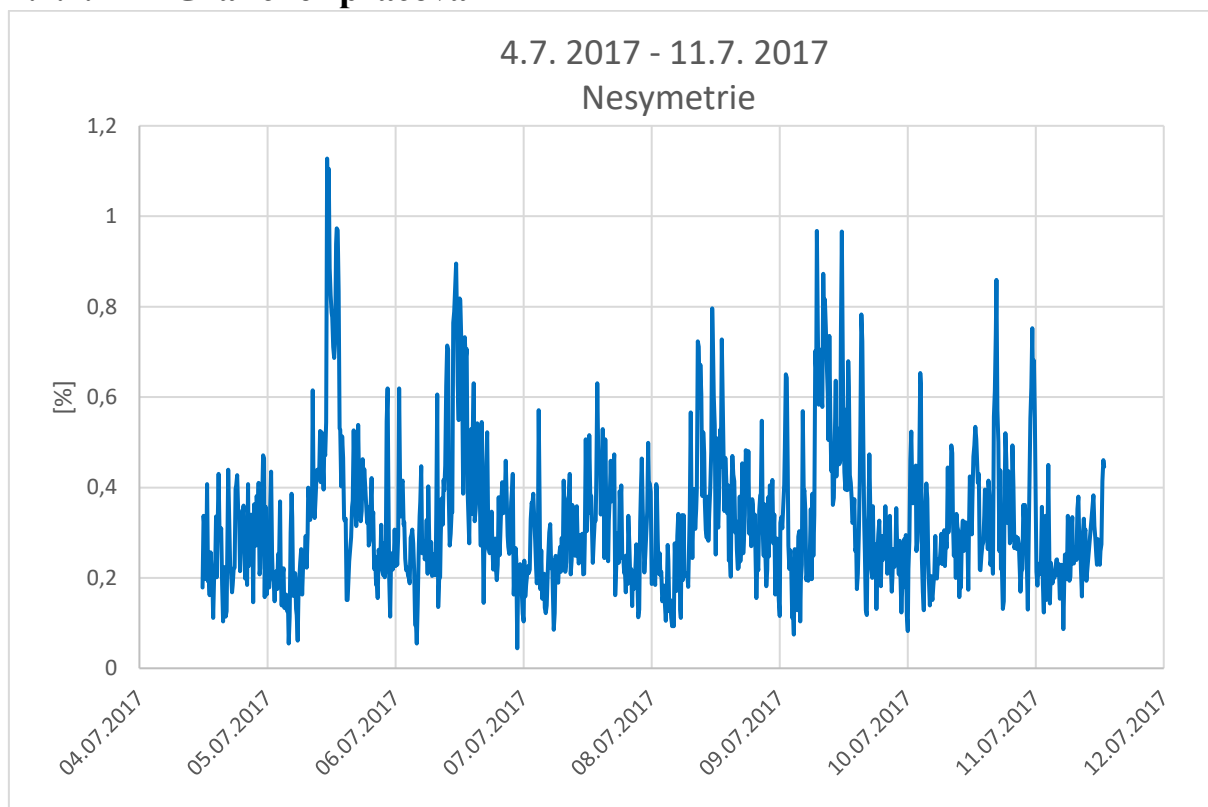
Obrázek 102 Místo 6 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie

4.6.2. Vyhodnocení

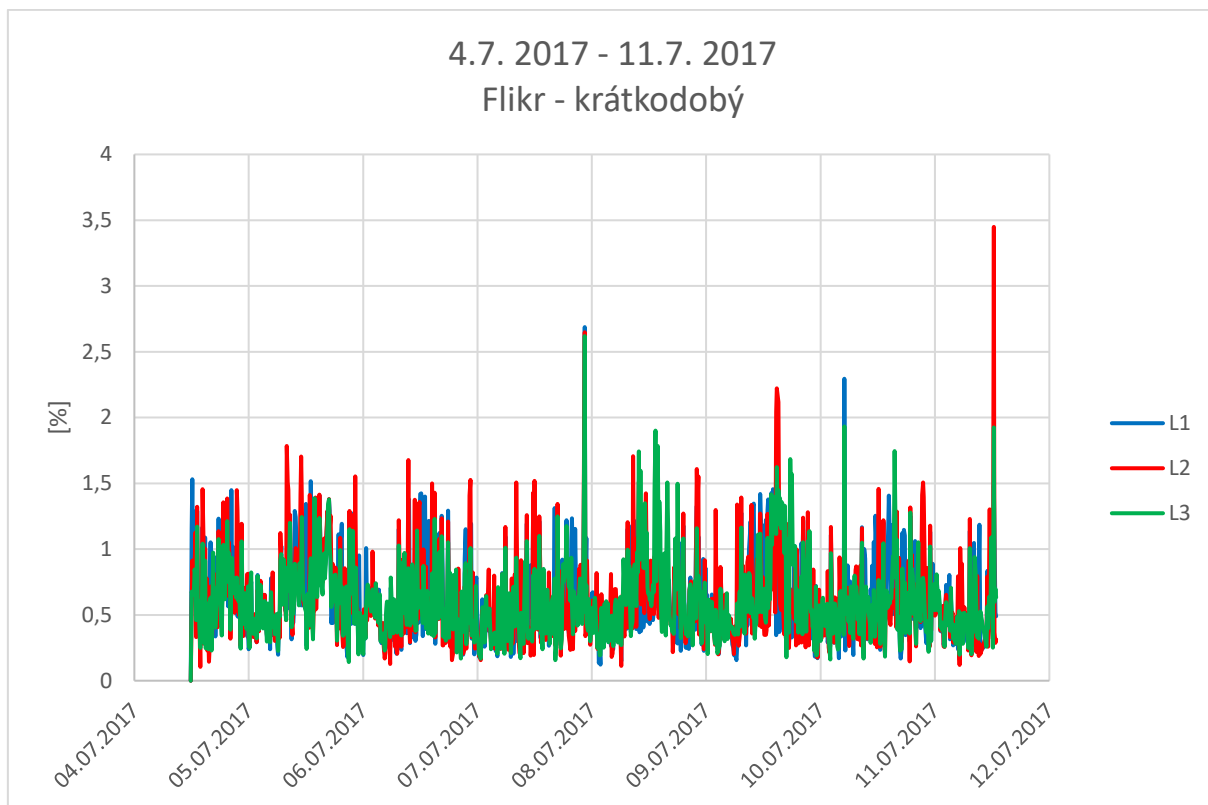
Šesté měření probíhalo v období 1.6.2017 – 8.6.2017. Obvyklé hodnoty pro nesymetrii se pohybovaly v rozmezí 0,1 – 0,7 %. V měřeném období docházelo k výkyvům, kdy k největší takové došlo 3.6. v odpoledních hodinách o velikosti 1,2 %. U průběhu dlouhodobého flikru se v prvních pěti dnech nejvíce na jeho tvorbě podílela fáze L2. V dalších dnech převažovala fáze L1, u které byla naměřena nejvyšší hodnota flikru 1,4 % za měřené období. Hodnoty THD U oproti předešlým měřením dosahovaly vyššího zkreslení a pohybovaly se v rozmezí 2 – 3,5 %. Z průběhu THD U, 3. a 5. harmonické vidíme, že v ranních hodinách došlo k výraznému nárůstu zkreslení a následně pokles téměř o 1 %. V průběhu dne pak docházelo k pomalejšímu nárůstu a ve večerních hodinách se hodnota zkreslení vyšplhala až k rannímu maximu. Další grafy opět znázorňují podíl na zkreslení jednotlivých harmonických s jejich maximální naměřenou hodnotou za měřené období. Zde největší podíl na zkreslení měla 3. a 5. harmonická složka. Souhrnný přehled parametrů zobrazuje, že parametr flikr nevyhovuje pro fázi L1 a tím tedy nesplňuje normu. Parametry nesymetrie a THD U nepřekračují limitní hodnoty a normu splňují.

4.7. Místo 7

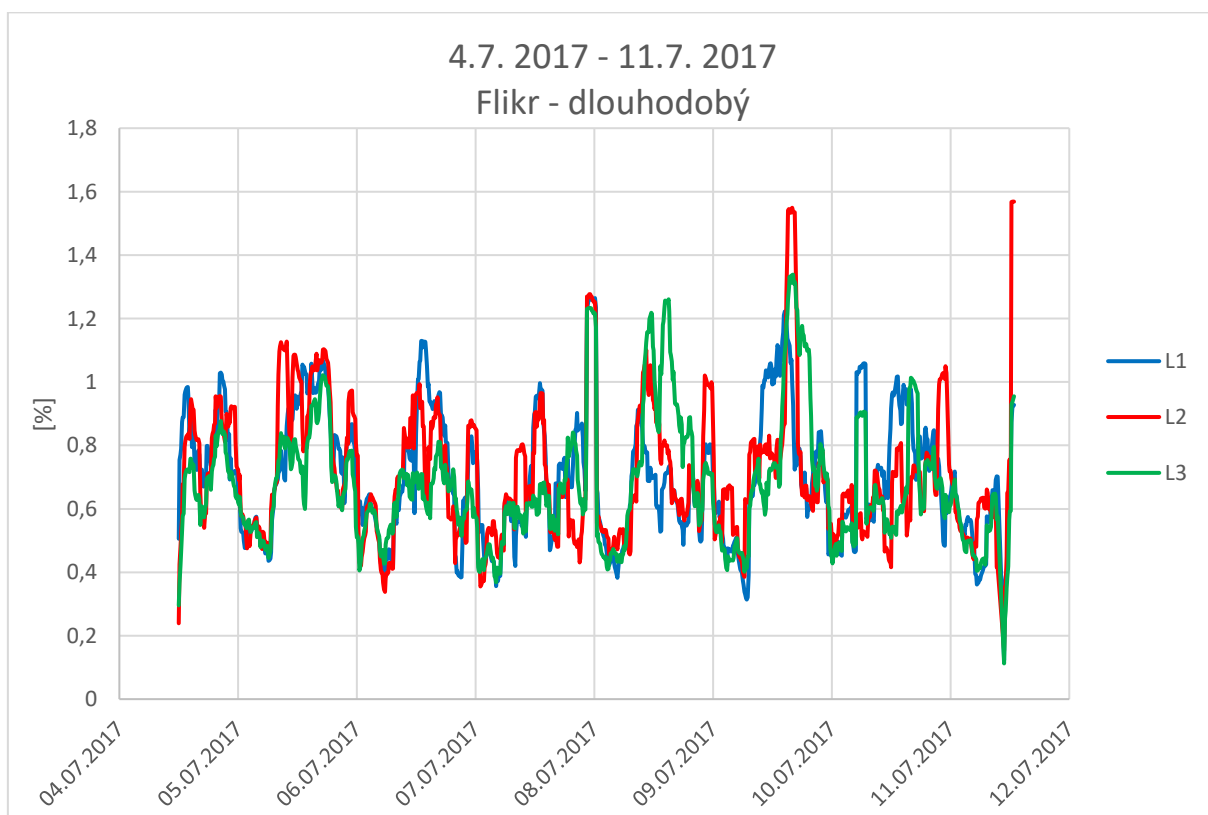
4.7.1. Grafické zpracování



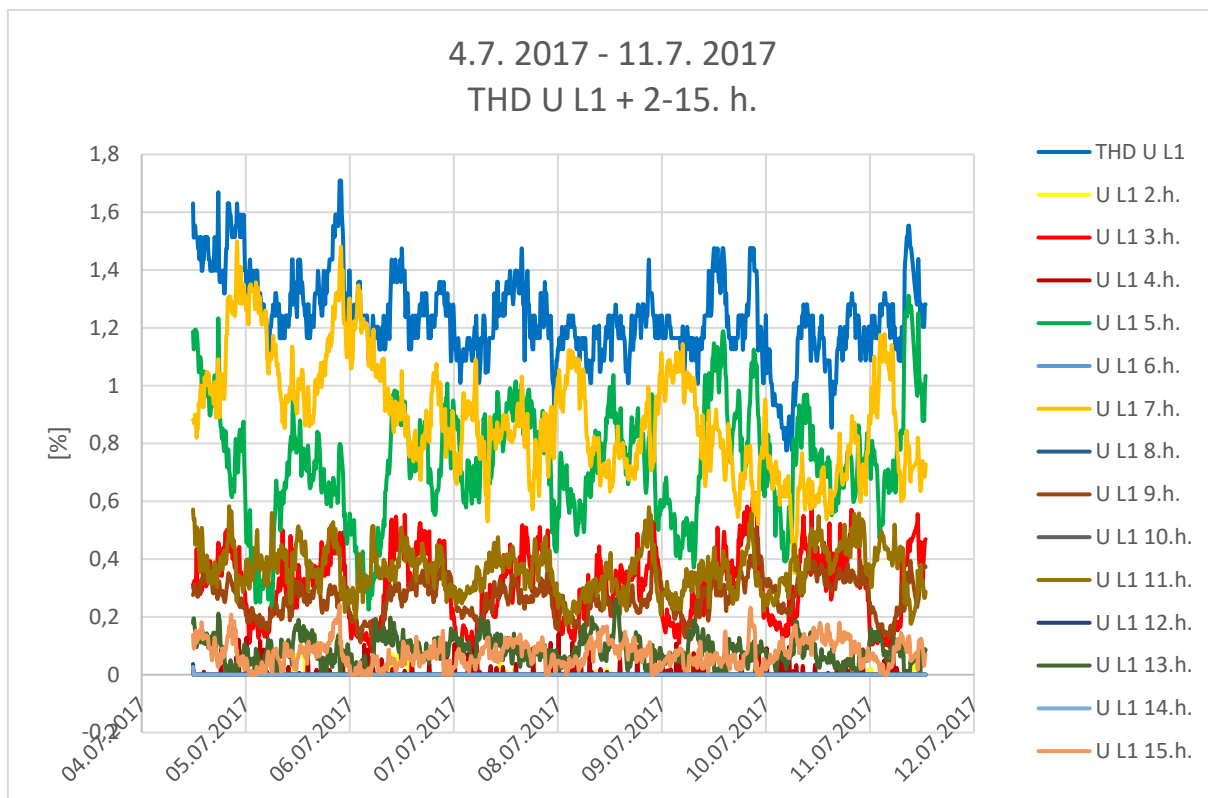
Obrázek 103 Místo 7 Průběh nesymetrie v časovém úseku 4.7.2017 – 11.7.2017



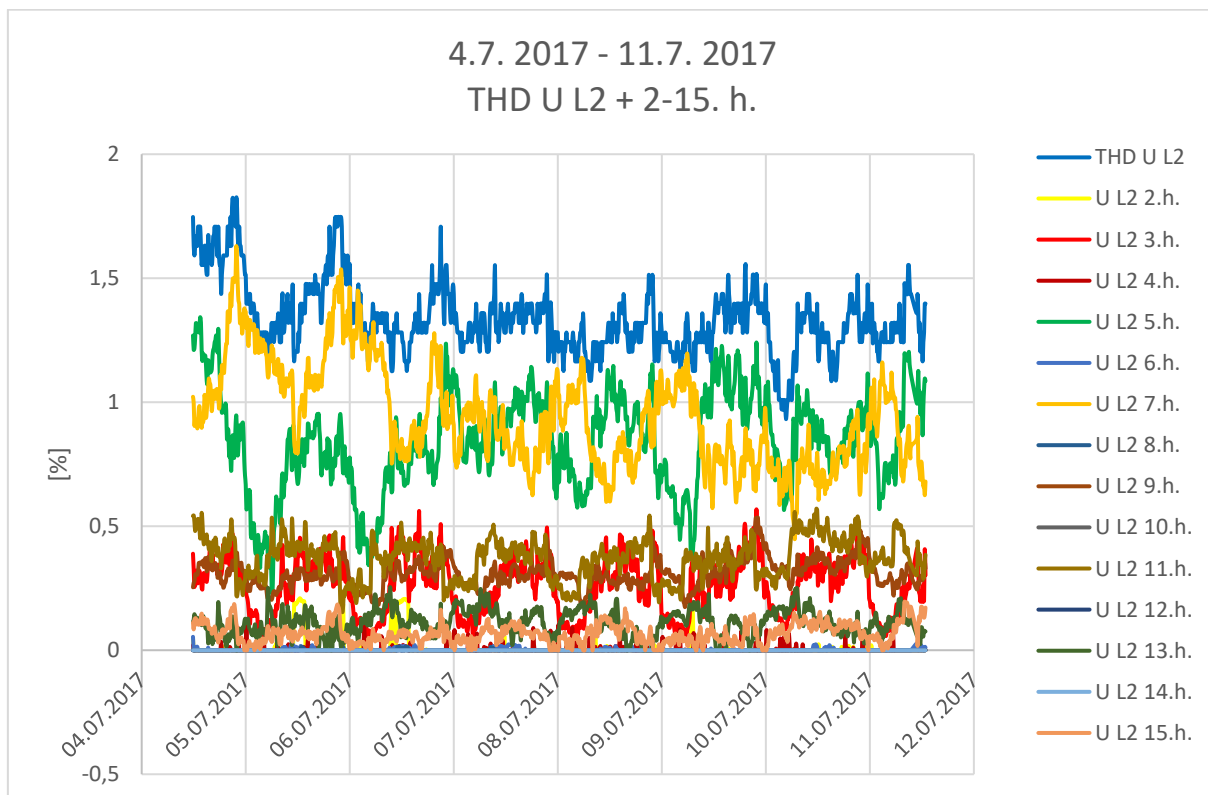
Obrázek 104 Místo 7 Průběh krátkodobého flikru v časovém úseku 4.7.2017 – 11.7.2017



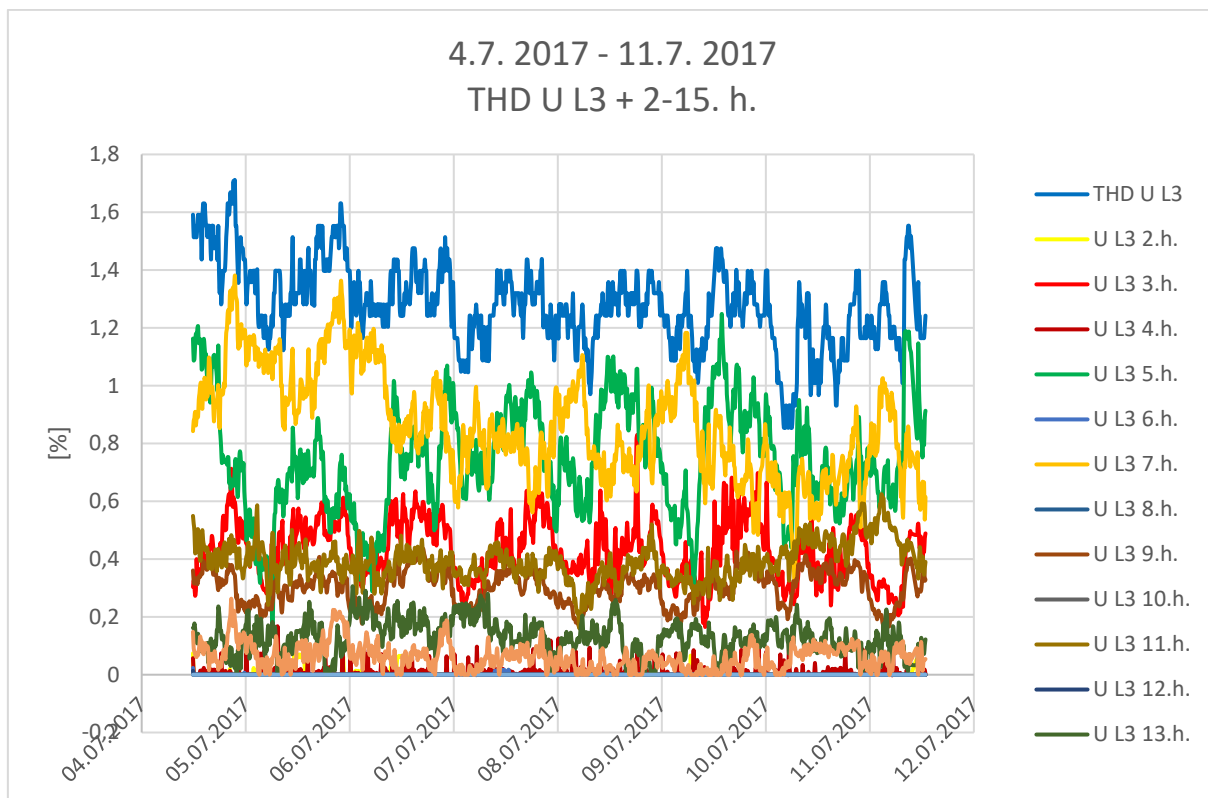
Obrázek 105 Místo 7 Průběh dlouhodobého flikru v časovém úseku 4.7.2017 – 11.7.2017



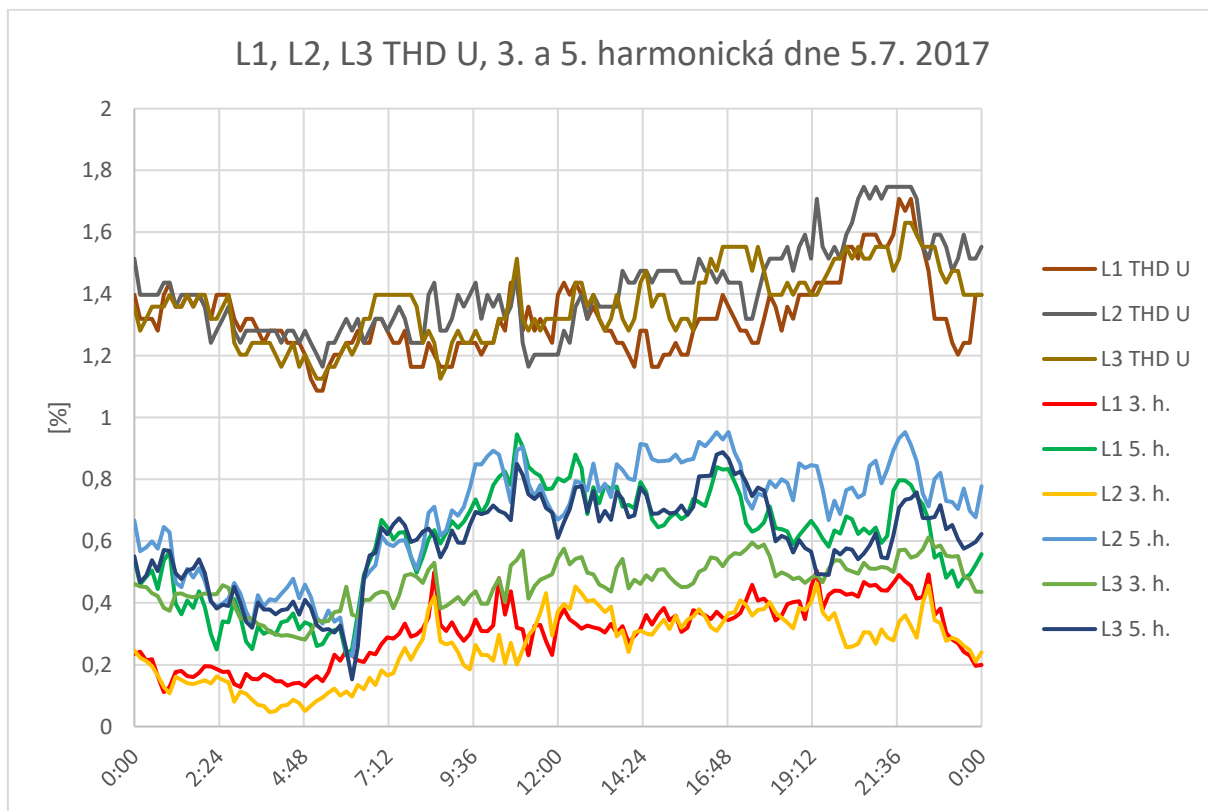
Obrázek 106 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L1 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017



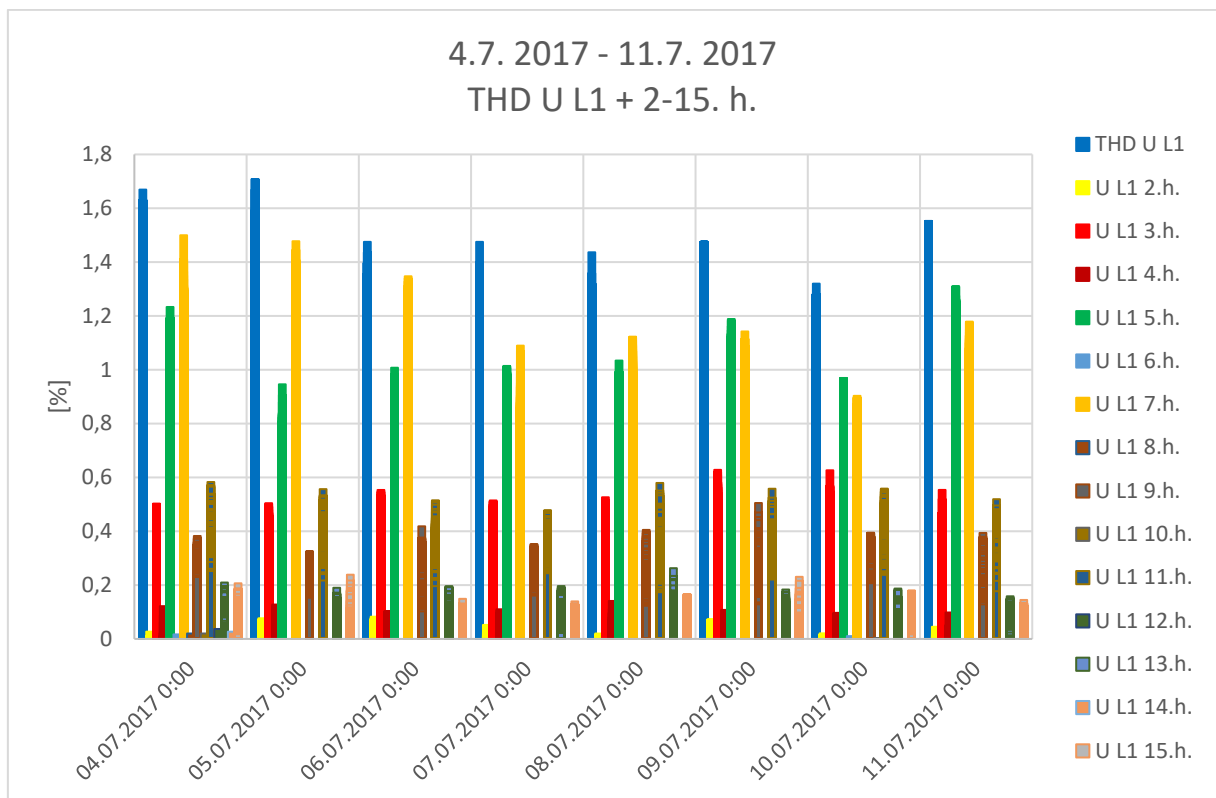
Obrázek 107 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L2 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017



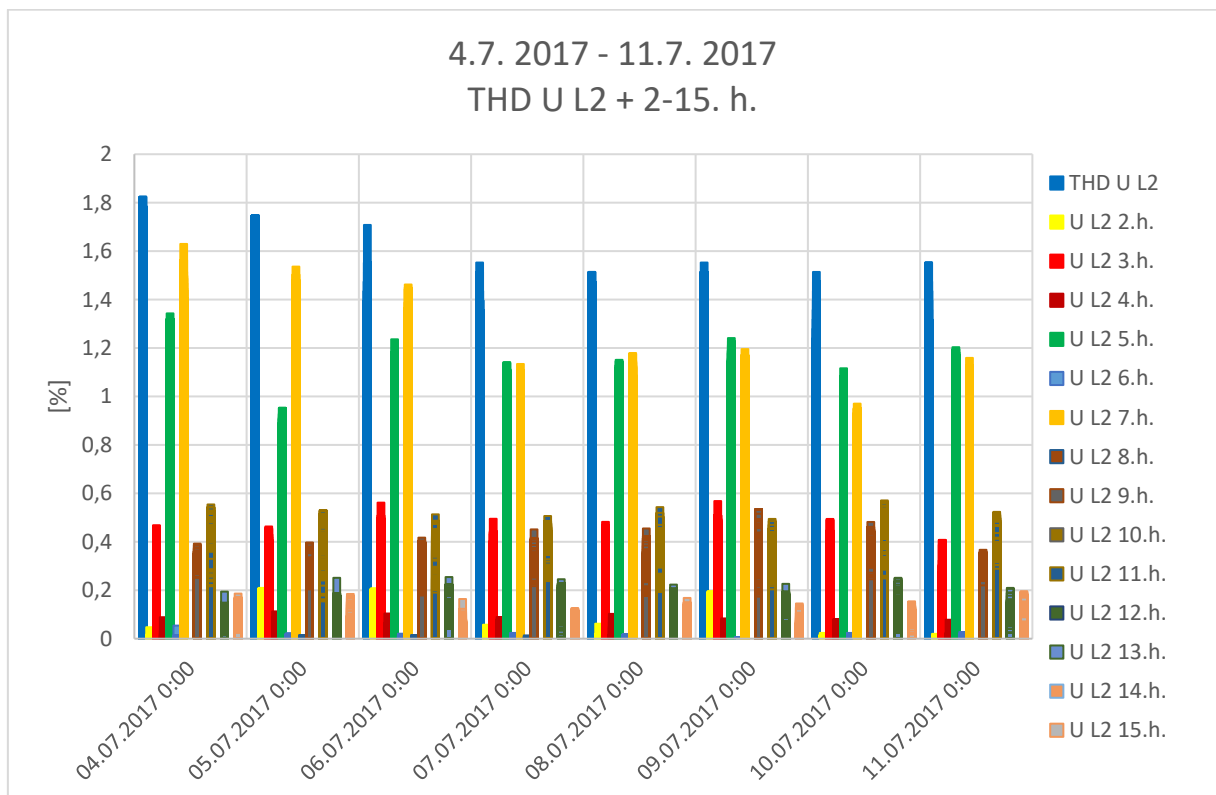
Obrázek 108 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí společně s harmonickými do 15. rádu pro fázi L3 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017



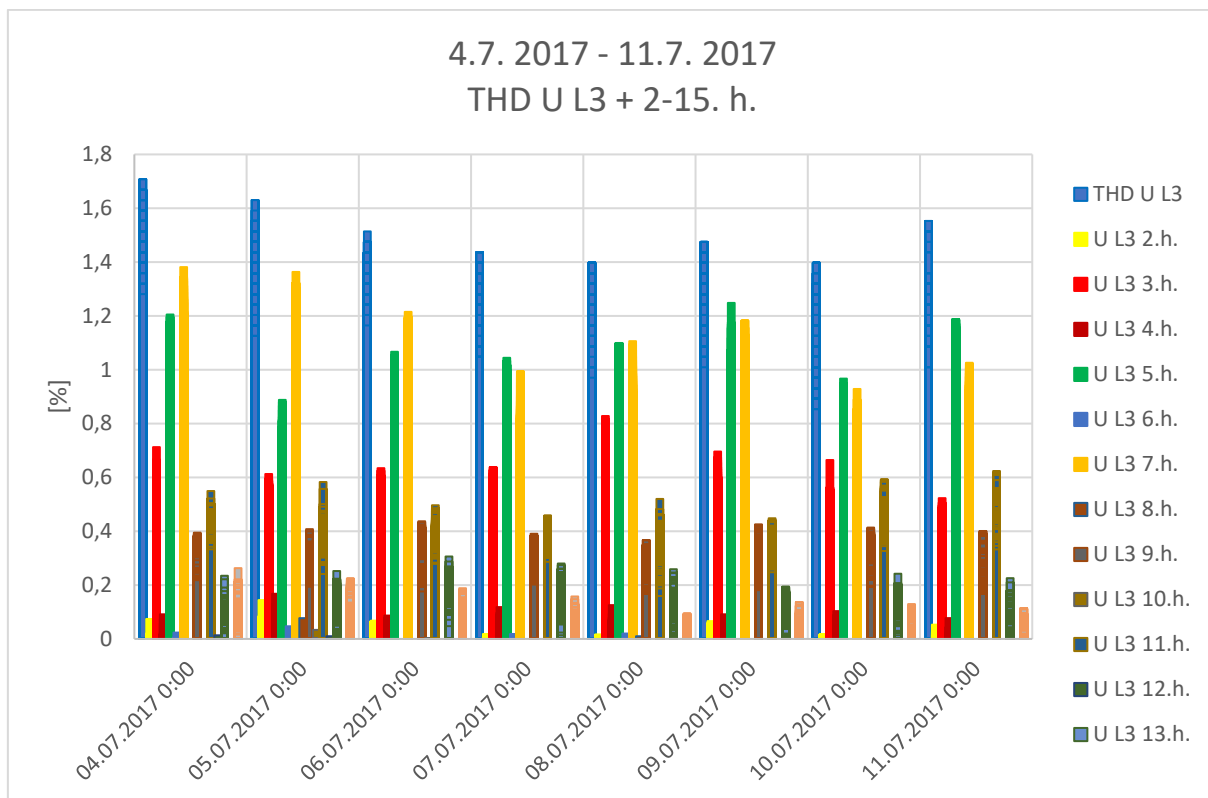
Obrázek 109 Místo 7 Průběh celkového harmonického zkreslení napětí s 3. a 5. harmonickou dne 5.7.2017 pro fázi L1, L2, L3



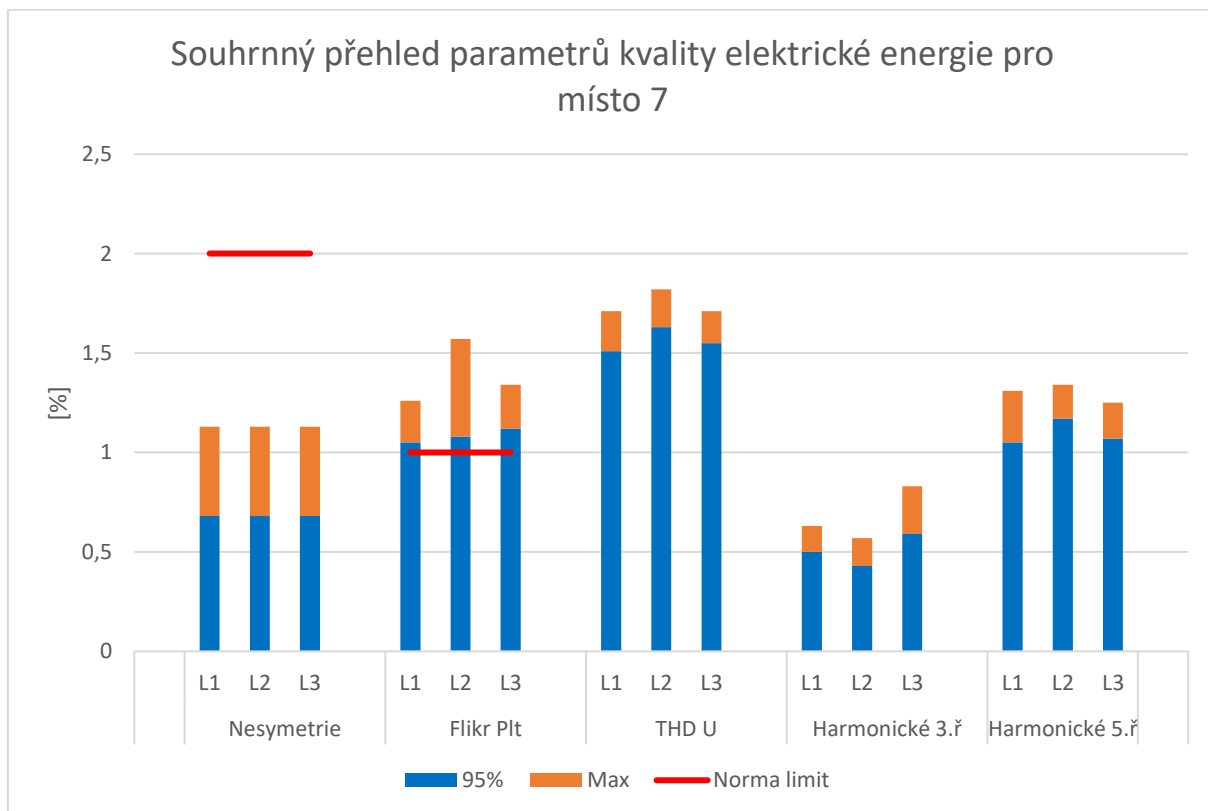
Obrázek 110 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L1 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017



Obrázek 111 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L2 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017



Obrázek 112 Místo 7 Celkové harmonické zkreslení napětí a velikost jednotlivých harmonických pro fázi L3 v čase 4.7.2017 – 11.7.2017



Obrázek 113 Místo 7 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie

4.7.2. Vyhodnocení

Sedmé měření probíhalo v období 4.7.2017 – 11.7.2017. Nesymetrie se pohybovala v rozmezí 0,1 – 0,5 %. Během měřeného období opět docházelo k výkyvům nesymetrie, a to převážně během odpoledních hodin. Nejvyšší zaznamenaná hodnota byla dne 5.7. a dosahovala hodnoty 1,1 %. Průběh dlouhodobého flikru se v tomto případě pohyboval v intervalu 0,4 – 1,1 %. Větší odchylky oproti normálnímu stavu nastaly ve dnech 9.7. a 11.7. Velikost obou odchylek se rovnala přibližně 1,6 % a největší podíl na tom měla fáze L2. THD U společně s harmonickými do 15. řádu, se v průběhu měřeného období rapidně nezměnilo. Došlo pouze k nepatrnému poklesu o pár desetín procent. Z průběhu THD U, 3. a 5. harmonické dne 5.7. vidíme, že zkreslení během dne převážně rostlo až do večerních hodin, kde následně došlo k poklesu. Z dalších grafů si můžeme všimnout, že největší podíl na zkreslení měla 5. a 7. harmonická. Z posledního grafu souhrnného přehledu parametrů je zřejmé, že norma není splněna pro parametr flikr ve všech třech fázích. Parametry nesymetrie a THD U normu splňují.

5 Srovnání vyhodnocených dat

V předchozí části práce jsme se zaměřili na zpracování a vyhodnocení naměřených dat. Následně budeme mezi sebou srovnávat jednotlivá místa.

Pro přehlednější orientaci, byla vytvořena tabulka (Tab. 5), která nám dává souhrnný přehled o měřených parametrech nesymetrie, flikru a THD U. Parametry byly posuzovány dle normy ČSN EN 50160, kdy 95 % hodnot během námi měřeného období nesmí překročit stanovenou limitní hodnotu. Pro nesymetrii je stanovena hodnota ≤ 2 . Z tabulky vidíme, že u parametru nesymetrie nedošlo ani v jednom z míst k překročení limitu. Nejvyšší naměřená hodnota nesymetrie byla v místě 1 na hodnotě 1,08 % a nejnižší v místě 4 o hodnotě 0,56 %. Druhým parametrem je flikr, který je stanoven hodnotou ≤ 1 . Z tabulky je patrné, že k překročení limitu došlo hned v 5 případech. K nejvyššímu překročení došlo v místě 1, kdy hodnoty ve fázích se pohybovaly od 1,51 % do 1,66 %. U místa 2 došlo k překročení ve fázích L2 a L3, kdy hodnoty dosahovaly 1,08 % a 1,05 %. U míst 3 a 6 došlo k překročení pouze v jedné z fází. Nejnížší hodnoty flikru byly naměřeny v místě 5. Třetím parametrem je THD U, který je stanoven na hodnotě ≤ 8 . Z naměřených hodnot je zřejmé, že k překročení parametru nedošlo a místa dle normy vyhovují. K největšímu zkreslení došlo v místě 6 a to ve fázi L3 na hodnotě 3,42 %. Naopak nejnížší zkreslení bylo naměřeno v místě 7 a to ve fázi L1 o velikosti 1,51 %. Zkreslení u zbylých míst se od sebe příliš nelišilo a pohybovalo se v rozmezí od 2 % do 2,5 %.

Tabulka 5 Souhrnný přehled parametrů kvality elektrické energie pro měřená místa

	Nesymetrie 95%	Flikr 95%			THD U 95%		
Fáze		L1	L2	L3	L1	L2	L3
limit	$\leq 2 \%$	$\leq 1 \%$	$\leq 1 \%$	$\leq 1 \%$	$\leq 8 \%$	$\leq 8 \%$	$\leq 8 \%$
M1	1,08	1,51	1,6	1,66	2,06	2,06	2,1
M2	0,63	0,93	1,08	1,05	1,9	1,71	1,63
M3	0,77	0,56	1,03	0,66	2,02	2,17	2,29
M4	0,56	0,64	0,46	0,65	2,56	2,33	2,21
M5	0,66	0,52	0,52	0,58	2,14	2,48	2,33
M6	0,78	1,08	0,75	0,63	3,3	2,87	3,42
M7	0,68	1,05	1,08	1,12	1,51	1,63	1,55

Další tabulka (Tab. 6), které není pro samotné vyhodnocení až tak důležitá, nám dává přehled, jak a také jakou mírou ovlivňují jednotlivé harmonické celkový činitel harmonického zkreslení. Podle limitů, jak jsou definovány jednotlivé harmonické můžeme z tabulky vyčíst, které z nich by měli mít největší podíl na zkreslení v síti. Právě tuhle skutečnost, že nejvyšší podíl na zkreslení má 5. harmonická, jasně z naměřených hodnot v tabulce vidíme. Druhý největší podíl na zkreslení představuje 3. harmonická, která měla u 4 ze 7 míst druhé největší zkreslení. Třetí nejvíce zkreslující byla 7. harmonická. Dále si můžeme všimnout 9. a 11. harmonická, že také představuje určitý podíl na zkreslení.

Tabulka 6 Souhrnný přehled harmonických 2. – 15. řádu pro měřená místa

95%		2. řád h.	3. řád h.	4. řád h.	5. řád h.	6. řád h.	7. řád h.	8. řád h.	9. řád h.	10. řád h.	11. řád h.	12. řád h.	13. řád h.	14. řád h.	15. řád h.
	limit	≤ 2 %	≤ 5 %	≤ 1 %	≤ 6 %	≤ 0,5 %	≤ 5 %	≤ 0,5 %	≤ 1,5 %	≤ 0,5 %	≤ 3,5 %	≤ 0,5 %	≤ 3 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %
M1	L1	0,01	1,22	0,08	1,83	0,01	0,8	0	0,54	0	0,36	0	0,2	0	0,24
	L2	0,02	1,21	0,09	1,91	0	0,64	0,01	0,46	0	0,36	0	0,21	0	0,22
	L3	0,09	1,02	0,07	1,92	0,02	0,76	0,01	0,54	0	0,3	0	0,16	0	0,22
M2	L1	0,08	0,7	0,1	1,69	0	1,22	0,02	0,37	0,01	0,39	0	0,16	0	0,22
	L2	0,05	0,8	0,1	1,53	0	1,2	0	0,41	0,01	0,38	0	0,17	0	0,24
	L3	0,02	0,6	0,09	1,51	0	1,13	0,01	0,38	0	0,37	0	0,14	0	0,17
M3	L1	0,01	0,94	0,08	1,71	0,13	1,16	0	0,47	0	0,35	0	0,29	0	0,28
	L2	0	1,07	0,1	1,83	0,11	1,2	0	0,42	0	0,37	0	0,26	0	0,27
	L3	0,03	1,35	0,02	1,8	0,11	1,19	0	0,45	0	0,45	0	0,25	0	0,26
M4	L1	0,03	1,3	0,09	2,28	0	0,7	0,03	0,86	0	0,78	0	0,51	0	0,2
	L2	0,02	1,32	0,04	2	0,01	0,66	0	0,77	0	0,45	0	0,5	0	0,23
	L3	0,02	0,89	0,06	2,05	0,01	0,67	0,01	0,69	0	0,67	0	0,37	0	0,2
M5	L1	0	1,1	0,02	2,03	0,02	0,81	0	0,47	0	0,66	0	0,25	0	0,31
	L2	0	1,6	0	1,99	0,02	0,95	0	0,58	0	0,66	0	0,37	0	0,35
	L3	0	1,34	0	2,03	0,03	0,78	0	0,51	0,02	0,62	0	0,28	0	0,33
M6	L1	0,06	1,38	0,02	2,99	0	1,17	0,01	0,56	0	0,43	0,01	0,34	0	0,42
	L2	0,18	1,89	0,02	2,51	0,02	0,92	0,02	0,51	0,01	0,37	0,02	0,28	0	0,38
	L3	0,07	1,81	0,03	3,06	0,03	1,04	0,04	0,56	0,03	0,37	0,03	0,32	0,02	0,42
M7	L1	0,02	0,5	0,04	1,05	0	1,28	0	0,37	0	0,5	0	0,16	0	0,15
	L2	0,02	0,43	0,02	1,17	0,01	1,33	0	0,4	0	0,5	0	0,19	0	0,14
	L3	0,02	0,59	0,04	1,07	0	1,18	0	0,39	0	0,51	0	0,23	0	0,14

6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo analyzovat kvalitu parametrů v síti s WATTroutery.

Úvod teoretické části byl zaměřen na danou problematiku kvality elektrické energie. S tím je spojena norma ČSN EN 50160, ze které bylo vycházeno a byly stanoveny parametry, které byly stěžejní při vyhodnocování kvality elektrické energie.

Následující část byla zaměřena na rozbor stanovených parametrů a na to, jak docházelo ke vzniku odchylek, jakým způsobem je bylo možno eliminovat a jejich dopad na elektrickou síť. V další části bylo blíže nahlédnuto na přístroj WATTrouter, jeho princip a způsob využití.

Praktická část spočívala ve zpracování a vyhodnocení naměřených dat. Naměřené hodnoty byly zpracovány pro 7 různých míst během 7 různých časových období. Nejprve byly pro náš případ stanoveny 3 parametry (nesymetrie, flickr a THD U), které byly následně v dalších částech pro každé místo vyhodnoceny.

K vyhodnocení naměřených dat byly v první části využity grafy. Tyto grafy byly sestaveny pro příslušné parametry v závislosti na časovém období 7 dnů.

Z grafů nesymetrie bylo patrné, že k největším výkyvům došlo v místě M1. U druhého zkoumaného parametru flickru byla situace podobná a k největším výkyvům došlo také v místě M1. U třetího parametru THD U došlo k největšímu zkrácení v místě M6.

V druhé části se vyhodnocovaly naměřené hodnoty podle normy ČSN EN 50160, kdy 95 % hodnot nesmělo během měřeného týdenního období překročit předepsané limity. Vzhledem k proměnlivosti parametrů, které se v čase měnily vlivem zatížení, rušení vyvolané určitými zařízeními a výskytem poruch, se očekával určitý počet překročení. V některých případech dochází obzvláště k nepředvídatelným jevům, které nám dávají zavádějící informace. I v našem případě docházelo k takovým jevům, ale jejich četnost nebyla tak významná, aby ovlivnila výrazným způsobem výsledky. K vyhodnocení a porovnání výsledků byla využita Tab.5, která nám dala souhrnný přehled o parametrech. Z této tabulky je patrné, že u nesymetrie a THD U, nedošlo k překročení limitů. U flickru došlo k překročení limitních hodnot hned ve 4 ze 7 míst a k největšímu překročení došlo v místě M1.

Na základě informací o parametrech kvality elektrické energie můžeme říct následující. Jednotlivé parametry hrají svou roli a je potřeba je udržovat na co nejnižších odchylkách od normálních provozních podmínek. Pro napěťovou nesymetrii se zvyšujícími se odchylkami dochází u indukčních motorů k velké proudové nevyváženosti, která vede k nadměrnému oteplení a snížení životnosti izolace. U flickru vlivem spínání a rozpínání zátěží dochází k výpadkům výrobních zařízení. Pro harmonické jsou z energetického hlediska nejproblematictější harmonické složky liché. Velmi důležitými jsou harmonické násobky 3n řádu. Harmonické jsou ve fázi a z toho důvodu se 3n harmonické neprojeví ve fázovém vodiči, ale sčítají se v nulovém vodiči v soustavě s uzlem. Dalšími důležitými harmonickými jsou 5. a 11. Je to dáno tím, že jejich směr otáčení je proti složce základní a tím dochází k brždění motoru. Jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách, podle Tab.6 máme souhrnný přehled zastoupení jednotlivých harmonických v měřeném období. Největší podíl měly 3., 5., 7., 9. a 11. harmonická. Zdrojem 5., 7. a 11. harmonické jsou 6ti pulzní měniče a řízené pohony. Zdrojem 11. a 13. harmonických jsou 12ti pulzní měniče a pohony. Vliv harmonických v síti hraje velkou roli, která nám způsobuje přídatné oteplení, zvýšení ztrát a problémy způsobené rušením. Proto se snažíme harmonické co nejvíce redukovat.

Z toho všeho vyplývá, že důsledkem nízké kvality elektrické energie narůstají energetické ztráty (nízký účinník, kolísání napětí a proud ve středním vodiči).

Podle zmíněných výsledků některá místa vykazovala zhoršení kvality. Největší zhoršení bylo směrem k flikru, což se dalo předpokládat vzhledem k principu funkce WATTrouteru. Nicméně toto tvrzení se z malého vzorků měřených dat nedá prokázat a bylo by zapotřebí, aby měření zahrnovalo více vzorků s větším počtem WATTrouteru od více výrobců. U zjišťování flikru hraje jistou roli pozadí sítě. Nedá se tedy jednoznačně říct, že by WATTroutery zhoršovaly kvalitu parametrů v síti, ale je na zvážení provoz WATTrouteru, vzhledem k jejich možným negativním vlivům. Případně by se dalo uvažovat o úpravě legislativy nebo stanovení pravidel pro vliv WATTrouteru na kvalitu.

Použitá literatura

- [1] SANTARIUS, Pavel. ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA [online]. Ostrava 2007: Skripta, VŠB - Technická Univerzita Ostrava [cit. 2021-03-05].
- [2] Norma ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí ed. 3. 2011.
- [3] TLUSTÝ, Josef. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [4] CHAPMAN, David, Josef GAVLAS, Miloslav KUŽELA a Pavel SANTARIUS. Kvalita elektrické energie - úvod [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://copperalliance.eu/resources/kvalita-elektricke-energie1-1/?download=please>
- [5] HOLČÍK, Jiří. SIGNÁLY A LINEÁRNÍ SYSTÉMY [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3755976/>. Masarykova univerzita institut biostatistiky a analýz.
- [6] ZELENKA MS, Jan. Vliv UPS na harmonické v napájené síti telefonní ústředny dolů bílina [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/103848>. Diplomová práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.
- [7] VIKTOR, Hašpl. Aktivní filtry snižují zpětné působení nelineárních spotřebičů do sítě [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyssi-harmonicke-a-jejich-pusobeni-na-sit--11949>
- [8] CHAPMAN, David, Josef GAVLAS, Miloslav KUŽELA a Pavel SANTARIUS. Harmonické: Příčiny a účinky [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://copperalliance.eu/resources/kvalita-elektricke-energie3-1/?download=please>
- [9] 1. Měření a vyhodnocení harmonických nelineárních jednofázových spotřebičů [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/navody/mereni_1_1f.pdf
- [10] RUSEK, Stanislav a Jiří GURECKÝ. Přenos a rozvod elektrické energie. Ostrava, 2001. Skripta. VŠB - Technická univerzita Ostrava
- [11] FASSBINDER, Stefan, Josef GAVLAS a Pavel SANTARIUS. Harmonické: Pasivní filtry [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://copperalliance.eu/resources/kvalita-elektricke-energie3-3-1/?download=please>
- [12] CHAPMAN, David, Josef GAVLAS a Pavel SANTARIUS. Poklesy napětí: Úvod [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2002 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://copperalliance.fr/resources/kvalita-elektricke-energie5-1/?download=please>
- [13] REDAKCE ČASOPISŮ. <https://www.elektroprumysl.cz/energetika/rychle-zmeny-napeti> [online]. 2015 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/energetika/rychle-zmeny-napeti>
- [14] HANZELKA, Zbigniew, Andrzej BIENÍ, Josef GAVLAS a Petr KREJČÍ. Poruchy napětí: Flikr [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://copperalliance.fi/resources/kvalita-elektricke-energie5-1-4/?download=please>

- [15] SVOZIL, Petr. Flikr v distribučních a průmyslových sítích [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/136150/SVO0213_FEI_B2649_3907R001_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y . Bakalářská práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.
- [16] VOZKA, Aleš. *Zemní ochrany v distribuční síti* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html> . Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.
- [17] FUKALA, Bogdan. Vliv elektrické vozby na napájecí soustavu [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2021-03-07]. Diplomová práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Vedoucí práce Prof. Ing. Josef Paleček, CSc.
- [18] DRIESEN, Johan, Thierry VAN CRAENENBROECK, Pavel KREJČÍ a Miloslav KUŽELA. Rušení napětí: Úvod do nesymetrie [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://copperalliance.de/resources/kvalita-elektricke-energie5-1-3/?download=please>
- [19] LESKOVSKÝ, Vojtěch. Analýza přepětí v průmyslových sítích [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/94772629.pdf> . Diplomová práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.
- [20] CHRÁSTECKÝ, Lukáš. Testování svodičů přepětí [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=73516. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [21] Mach, V.: Technika vysokého napětí. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA 2001 a 2006
- [22] OTTO HAVELKA A KOLEKTIV. Elektrické přístroje [online]. Praha: STNL - Nakladatelství technické literatury, 1985 [cit. 2021-03-07]. ISBN 04-529-85.
- [23] KOBLIHA, Jan. Posouzení připojitelnosti průmyslového závodu s ohledem na zpětné vlivy na napájecí síť [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/22990> . Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
- [24] SOLAR CONTROLS S.R.O. WATTrouter MX - Uživatelská příručka: Návod k instalaci a nastavení přístroje [online]. 2020 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: https://solarcontrols.cz/archives/eshop/WATTrouterMx_CZ.pdf
- [25] BILÍK PETR ELCOM, A. S. Monitorování kvality elektřiny [online]. 2008 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/monitorovani-kvality-elektřiny--11770>
- [26] PQ monitor MEg38/C: Uživatelský návod [online]. 2016 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://www.e-mega.cz/doc/cz/MEg38C.pdf>
- [27] Přenosný PQ monitor MEg38/C [online]. 2007 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://www.e-mega.cz/?pg=meg-38c>
- [28] PODSTAWKA, Martin. Vytvoření metodiky pro testování měřících přístrojů a sledování parametrů kvality [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z:

<http://dspace5.vsb.cz/handle/10084/136102> . Bakalářská práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Vedoucí práce Ing. Richard Velička, Ph.D.

[29] JANÍK, David. Vyhodnocení kvalitativních parametrů elektrické energie pro průmyslovou budovu provozovanou v ostrovním režimu [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/128544> . Bakalářská práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Vedoucí práce Ing. Lukáš Prokop, Ph.D.

[30] Power Quality Monitor for permanent installation: PQ-Monitor system UP-2200 [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://www.steoelectric.be/user/image/unipower-up-2210.pdf>